ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی سازه
۱۸-۱۹ آبان ماه ۱۴۰۱
تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

IRAST 2022

کد مقاله: IRAST-1027

بررسی کوتاه‌شدگی ستون‌ها در قاب‌های فولادی دوگانه دارای سیستم مهاربندی همگرا (CBF) تحت اثرات ساخت مرحله‌ای

مصطفی عباد[۱*]، سعید اصیل قره‌باغی[۲]، نادر فنائی[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، mostafa_ebad@yahoo.com
*نویسنده مسئول
[۲] دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، asil@kntu.ac.ir
[۳] دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، fanaie@kntu.ac.ir

چکیده

در سازه‌های فولادی با سیستم قاب خمشی دوگانه همراه با مهاربندی همگرا (CBF)، مهاربندهای کل سازه می‌تواند بصورت طبقه به طبقه همزمان با نصب اسکلت و یا در پایان ساخت کل اسکلت قاب خمشی نصب شوند. تاثیر روش ساخت با استفاده از تحلیل متعارف که در آن فرض می‌شود کل سازه در یک لحظه ساخته و سپس کلیه بارها به آن اعمال می‌شود، قابل بررسی و مطالعه نیست و نیاز به تحلیل ساخت مرحله‌ای می‌باشد. همچنین یکی از مهمترین عواملی که عدم درنظر گرفتن آن در اثر تحلیل متعارف و غفلت از تحلیل مرحله به مرحله، موجب تفاوت قابل توجه در نتایج تحلیل شده و باعث می‌شود از ظرفیت سازه کاملا استفاده نشود، مسئله کوتاه‌شدگی ستون‌ها است. لذا در این تحقیق نمودار کوتاه‌شدگی ستون‌ها در قاب‌های فولادی دوگانه ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ طبقه دارای مهاربند همگرای شورون هفتی، شورون هشتی، Split_X و X ناشی از ساخت مرحله‌ای در نرم افزار ETABS مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. از این تحقیق نتیجه گردید مقادیر کوتاه‌شدگی ستون‌های مختلف مدل‌های مذکور، در تحلیل یک مرحله‌ای، روندی رو به رشد در ارتفاع سازه دارد، در حالی که در تحلیل مرحله به مرحله، از روند رو به رشد آن در ارتفاع به مراتب کاسته می‌شود و در طبقات میانی سازه، بیشترین مقدار خود را دارد. همچنین در صورتیکه تعداد طبقات ساخته شده در هر مرحله افزایش یابد، تاثیر ساخت مرحله‌ای بر کوتاه-شدگی ستون‌ها کاهش یافته و نمودار کوتاه‌شدگی مدل ساخت مرحله‌ای به مدل متعارف نزدیکتر می‌شود. در این تحقیق نیز یک اثبات ریاضی نادقیق برای شکل نمودار مذکور ارائه گردید.

کلمات کلیدی:

تحلیل متعارف، تحلیل ساخت مرحله‌ای، کوتاه‌شدگی ستون، مهاربند همگرا.

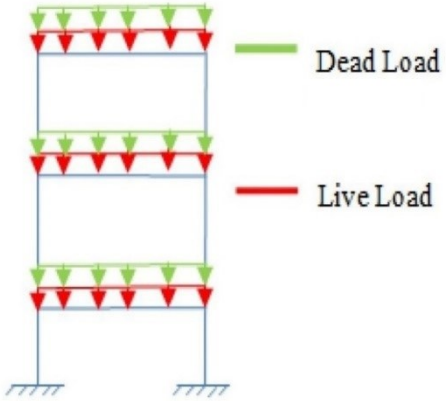
۱- مقدمه

در روش تحلیل متعارف سازه‌ها، بارهای ثقلی پس از مدل‌سازی کل سازه، به سازه اعمال می‌شود، در صورتیکه در واقعیت، سازه در چندین مرحله مختلف که می‌تواند بصورت طبقه به طبقه (متعارف در سازه‌های بتنی) و یا چند طبقه در هر مرحله (متعارف در سازه‌های فولادی) ساخته شود. طبقات ساخته شده سازه، تحت بارهای ثقلی تغییرشکل می‌یابند و طبقات جدید بر روی سازه تغییرشکل یافته جدید قرار می‌گیرند. تغییرشکل‌های نهایی سازه، از مجموع کلیه تغییرشکل‌های رخ داده در هر مرحله تا تکمیل نهایی سازه حاصل می‌شود. لذا بارهای اعمالی فرض شده به سازه در روش تحلیل متعارف، با روش ساخت واقعی تطابق نخواهد داشت، در نتیجه می‌بایست سازه در هر مرحله ساخت، با در نظر گرفتن تغییرات بارهای آن مرحله تحلیل شود. این روش به عنوان تحلیل ساخت مرحله‌ای[۱] یا تحلیل توالی ساخت[۲] شناخته می‌شود [۱]. در شکل‌های ۱ و ۲ تفاوت تحلیل متعارف و تحلیل

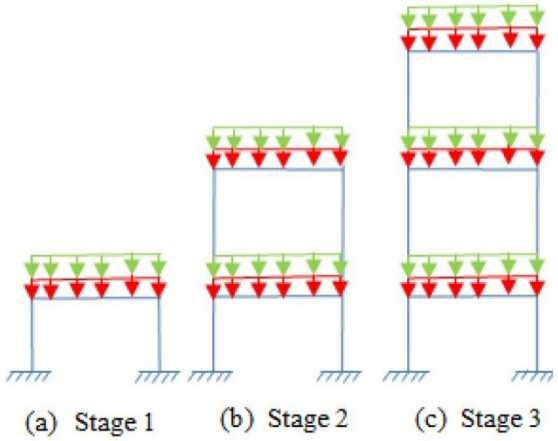
[۱] Staged Construction Analysis
[۲] Construction Sequence Analysis

کد مقاله: IRAST-1027

ساخت مرحله‌ای به صورت شماتیک نشان داده شده است. تحلیل توالی ساخت (CSA) یک روش تحلیل غیرخطی است که در آن سازه در مراحل مختلف، متناسب با مراحل ساخت تحلیل می‌شود و بارهای مورد نیاز در هر مرحله به سازه اعمال می‌شود [۱].

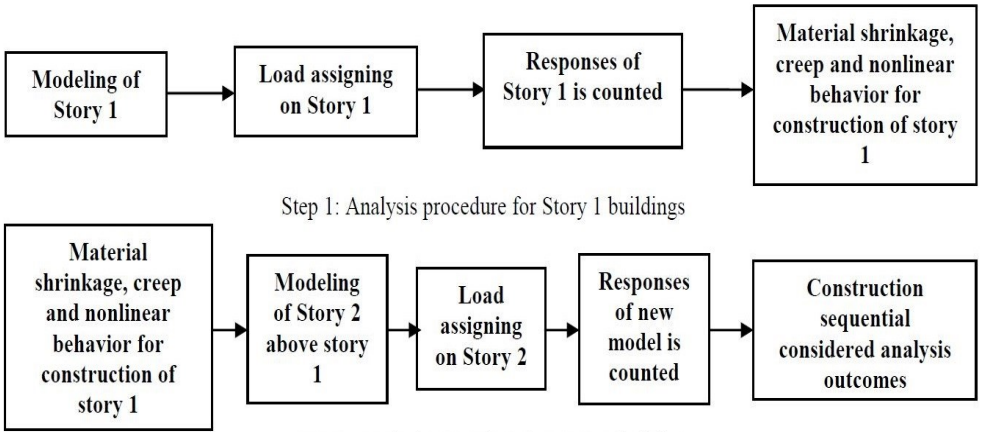


شکل ۱: تحلیل متعارف [۱]



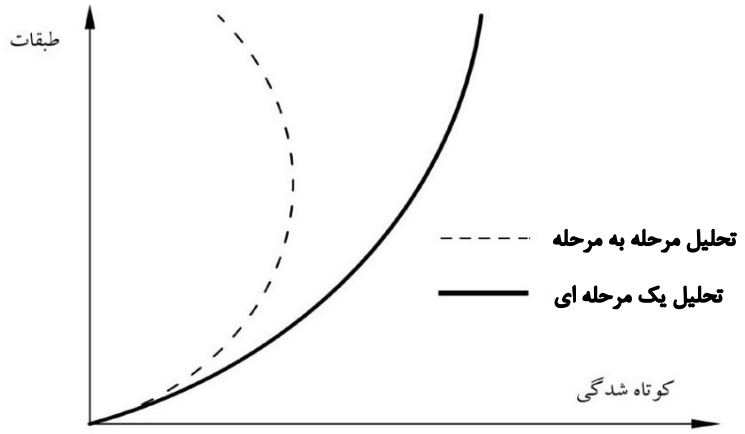
شکل ۲: تحلیل توالی ساخت [۱]

در شکل ۳ مراحل گام به گام تحلیل توالی ساخت برای یک سازه دو طبقه ترسیم شده است [۲]. همانطور که در شکل به وضوح دیده می‌شود، ابتدا طبقه اول مدل‌سازی می‌شود. سپس بارهای طبقه اول به آن اعمال و پاسخ سازه محاسبه می‌گردد. در سازه-های بتنی که خارج از موضوع این تحقیق می‌باشد، با توجه به عمر بتن، انقباض و خزش بتن محاسبه و تغییرشکل‌های ناشی از عوامل مذکور در طبقه اول اعمال می‌شود. در گام بعدی طبقه دوم مدل‌سازی و بارهای مربوط به آن طبقه اختصاص می‌یابد. در نهایت پاسخ سازه محاسبه می‌گردد.



شکل ۳: مراحل تحلیل توالی ساخت برای یک سازه ۲ طبقه [۲]

یکی از مهمترین عواملی که عدم درنظر گرفتن آن در اثر طراحی متداول و یک مرحله‌ای و غفلت از آنالیز مرحله به مرحله، موجب تفاوت قابل توجه در نتایج آنالیز شده و باعث می‌شود که از ظرفیت سازه کاملا استفاده نشود، مسئله کوتاه‌شدگی ستون‌ها است [۳]. نمودار کوتاه‌شدگی ستون‌ها در تحلیل متعارف (تحلیل یک مرحله‌ای) و تحلیل ساخت مرحله‌ای (تحلیل مرحله به مرحله) مطابق شکل ۴ می باشد.



شکل ۴: کوتاه‌شدگی ستون‌ها تحت دو تحلیل مرحله به مرحله و یک مرحله ای [۳]

پانیگراهی[۱] و همکاران [۱] تحلیل ساخت مرحله‌ای و تحلیل متعارف را برای سه مدل ۲۰، ۴۵ و ۶۸ طبقه بتن مسلح در نرم‌افزار ETABS بررسی نمودند. در این تحقیق اثر ساخت مرحله‌ای بر نیروی محوری، نیروی برشی، لنگر خمشی و تغییرمکان ستون‌ها و تیرها مورد مطالعه قرار گرفت. مطابق نتایج این تحقیق، نیروی محوری در ستون شناور[۲] که توسط تیر باربر تحمل می‌شود، در حالت تحلیل ساخت مرحله‌ای حدود ۸۰٪ نسبت به حالت تحلیل متعارف، افزایش می‌یابد. همچنین در ستون دیگری که تا روی فونداسیون ادامه دارد و بصورت شناور نمی‌باشد، تحلیل ساخت مرحله‌ای موجب افزایش حدود ۳۰٪ در نیروی محوری ستون مذکور نسبت به تحلیل متعارف می‌شود. همچنین لنگر خمشی، نیروی برشی و تغییرشکل تیر انتقال[۳] (تیری که ستون شناور روی آن قرار گرفته است)، حدود ۲۵٪ در حالت تحلیل ساخت مرحله‌ای نسبت به تحلیل متعارف افزایش پیدا می‌کند. داس[۴] و پراسیدا[۵] [۴] تحلیل ساخت مرحله‌ای و تحلیل متعارف را برای یک ساختمان تجاری ۹ طبقه مطالعه کردند. ساختمان مورد بررسی در نرم‌افزار ETABS برای انجام تحلیل ساخت مرحله‌ای مدل‌سازی گردید. تغییرمکان‌ها، لنگرهای خمشی و نیروهای برشی در هر دو تحلیل مورد بررسی و مطالعه قرار گرفتند. در تحلیل متعارف، بارهای مرده، زنده، باد و زلزله بطور همزمان به کل سازه اعمال شدند. از مقایسه نتایج مشخص گردید که تغییرمکان، لنگر خمشی و نیروی برشی برای تحلیل متعارف، برای طبقات پایین کمتر و برای طبقات بالا بیشتر از تحلیل ساخت مرحله‌ای بدست می‌آید. همچنین اثر کوتاه‌شدگی ستون یک ملاحظه بزرگ در طراحی و ساخت ساختمان‌های بلند، بخصوص ساختمان‌های با سیستم بتنی یا مختلط می‌باشد. رائو[۶] و همکاران [۵] نتایج تحلیل ساخت مرحله‌ای و تحلیل متعارف را برای یک ساختمان ۲۴ طبقه که در منطقه لرزه‌ای III قرار داشت مقایسه کردند. نتایج تحلیل برای تیر انتقال و قاب بالای آن مقایسه گردید. از تحقیق انجام شده نتیجه گرفته شد که در تحلیل ساخت مرحله‌ای افزایش قابل ملاحظه‌ای در بارها و تغییرمکان‌ها نسبت به تحلیل متعارف وجود دارد. امین[۷] و ماهاجان[۸] [۶] برای مطالعه اثر تحلیل ساخت مرحله‌ای بر روی ساختمان‌های چند طبقه، با استفاده از نرم‌افزار ETABS تحلیل متعارف و تحلیل توالی ساخت را بر روی سه ساختمان ۵، ۷ و ۹ بتن مسلح انجام دادند. در این تحقیق پارامترهایی مانند لنگر خمشی، نیروهای محوری و برشی و تغییرمکان تحت بارهای زلزله و باد در هر دو روش تحلیل مذکور بررسی شدند. از این تحقیق نتیجه گردید که تحلیل توالی ساخت برای بهبود دقت تحلیل از نظر تغییرمکان، نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی در تیرهای تکیه‌گاهی و ستون

---

۱ Panigrahi
۲ Floating Column
۳ Transition Beam
۴ Das
۵ Praseeda
۶ Rao
۷ Amin
۸ Mahajan

نزدیک آن و همچنین کل سازه، برای سازه‌های بتنی مسلح و فولادی ضروری است. شیرهاتی[۱] و واناکودره[۲] [۷] اثرات تحلیل-های استاتیکی خطی، وابسته به زمان و ساخت مرحله‌ای برای سازه‌های بتنی مسلح و فولادی را بررسی نمودند. برای هر ساختمان بتن مسلح و فولادی، شش مدل ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ طبقه بصورت سه‌بعدی در نرم‌افزار ETABS مدل‌سازی گردید. از این تحقیق مشخص شد که ساخت مرحله ای موجب افزایش قابل توجه نیروی برشی و لنگر خمشی در تیر دارای ستون شناور می شود. پارانای[۳] و همکاران [۸] و جاگارلامودی[۴] و مانوج[۵] [۹] یک ساختمان ۲۲ طبقه با ستون شناور و تیر انتقال را بصورت تحلیل متعارف و تحلیل ساخت مرحله‌ای در نرم‌افزار ETABS بررسی کردند. در این تحقیق نتیجه شد برای ساختمان‌های چند طبقه با ستون شناور و تیر انتقال ضروری است که اثرات ساخت مرحله‌ای درنظر گرفته شود. دینار[۶] و همکاران [۲] قاب‌های سه-بعدی بتن مسلح و فولادی با ترکیب‌بندی متفاوت را طبق ساخت مرحله‌ای تحلیل نمودند. اثرات وابسته به زمان خزش، انقباض، تغییرات سختی بتن با زمان و بارگذاری مرحله‌ای برای تحلیل ۱۲ مدل سه‌بعدی در نظر گرفته شده بود. در این تحقیق مشخص شد که ساخت مرحله‌ای موجب افزایش قابل توجه لنگر خمشی، نیروی برشی و تغییرمکان تیر دارای ستون شناور می شود و این افزایش با کاهش تعداد طبقات کاهش می‌یابد. پاسن[۷] و همکاران [۱۰] تعداد زیادی از قاب‌های بتن مسلح با تعداد و طول دهانه متفاوت و ارتفاع طبقات و تعداد طبقات مختلف را با استفاده از نرم‌افزار STAAD.pro بصورت متعارف و ساخت مرحله‌ای تحلیل کردند. در این بررسی نتیجه گردید که تحلیل ساخت مرحله‌ای حتی اگر از نیروهای زلزله در مراحل ساخت نیز صرف‌نظر شود، بسیار مهم است. چوی[۸] و همکاران [۳] اثرات توالی بارهای ثقلی را بر روی دو مدل ۶۰ طبقه فولادی و ۱۰ طبقه بتن مسلح (با و بدون دیوار برشی) بررسی کردند. مثال‌های عددی از این دو ساختمان بلند مرتبه به وضوح اهمیت اثر تفاضل کوتاه‌شدگی ستون‌ها را نشان داد. نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان داد که تفاضل کوتاه‌شدگی ستون و لنگر خمشی القایی آن در تحلیل ثقلی کل قاب بسیار با اهمیت است و نباید در تحلیل ساختمان‌های بلندمرتبه نادیده گرفته شود. نتایج کوتاه‌شدگی ستون‌ها مشابه شکل ۴ در این تحقیق ارائه شده است.

در سازه‌های فولادی با سیستم قاب خمشی دوگانه همراه با مهاربندی همگرا (CBF)، بدلیل اینکه قاب خمشی به تنهایی قادر به تحمل بارهای ثقلی و بارهای لرزه‌ای زمان ساخت می‌باشد، مهاربندهای کل سازه می‌تواند بصورت طبقه به طبقه همزمان با نصب اسکلت یا در پایان ساخت کل اسکلت قاب خمشی نصب شوند. لذا در این تحقیق کوشش می‌شود تا اثرات ساخت مرحله‌ای بر پدیده کوتاه‌شدگی ستون‌ها در قاب‌های فولادی دوگانه دارای سیستم مهاربندی همگرا شورون هفتی، شورون هشتی، Split_X و X در نرم‌افزار ETABS بررسی و مطالعه گردد.

۲- مدل‌سازی و طراحی متعارف نمونه‌های سه بعدی از قاب فولادی دوگانه با مهاربند همگرا

در این مرحله از تحقیق، ۲۰ مدل سه‌بعدی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ طبقه با سیستم قاب فولادی دوگانه و مهاربندهای همگرا شورون هفتی، شورون هشتی، Split_X و X با فرضیات ذیل در نرم‌افزار ETABS [۱۱] مدل‌سازی و بصورت متعارف طراحی گردید.

[۱] Shirhatti
[۲] Vanakudre
[۳] Paranay
[۴] Jagarlamudi
[۵] Manoj
[۶] Dinar
[۷] Pathan
[۸] Choi

۱- سیستم باربر ثقلی و جانبی کلیه مدل‌ها بصورت قاب خمشی فولادی با شکل پذیری متوسط (IMF)[۱] و مهاربند همگرای ویژه (SCBF)[۲] درنظر گرفته شده است.

۲- کلیه مدل‌ها در پلان بصورت سه دهانه ۵ متری در جهت X و Y می‌باشند. (شکل ۵)

۳- ارتفاع کلیه طبقات یکسان و به میزان ۳ متر درنظر گرفته شده است.

۴- در کلیه مدل‌ها، مطابق شکل ۶، مهاربند در دهانه میانی قاب‌های خارجی و در دو جهت تعبیه گردیده است.

۵- با توجه به اینکه سیستم باربر جانبی مدل‌ها در هر دو جهت یکسان می‌باشد، لذا جهت تیرریزی سقف‌ها بصورت شطرنجی مدل‌سازی گردید.

۶- فولاد مورد استفاده در کلیه مدل‌ها از نوع فولاد S235JR می‌باشد.

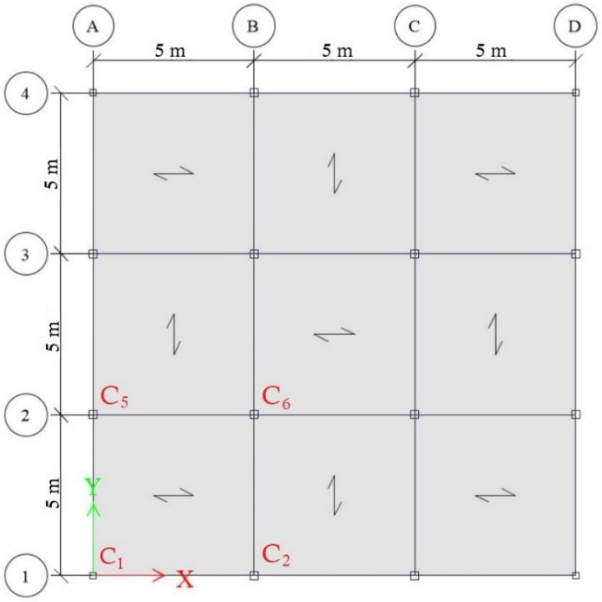
۷- بار مرده کلیه طبقات ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمربع و بار زنده کلیه طبقات ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع درنظر گرفته شده است. بارگذاری ثقلی مدل‌ها مطابق ویرایش سوم مبحث ششم مقررات ملی ساختمان [۱۲] و بارگذاری لرزه‌ای، مطابق آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش چهارم [۱۳] انجام گردید.

۸- محل ساخت در منطقه با خطر لرزه‌خیزی خیلی زیاد (نسبت شتاب مبنای طرح به شتاب ثقل برابر ۰,۳۵) و خاک محل ساخت نوع II می‌باشد.

۹- برای ستون‌ها از مقاطع قوطی، برای تیرها از مقاطع I شکل نورد شده اروپایی و در صورت نیاز از مقاطع I ساخته شده با ورق و برای مهاربندها از مقاطع دوبل ناودانی استفاده شده است.

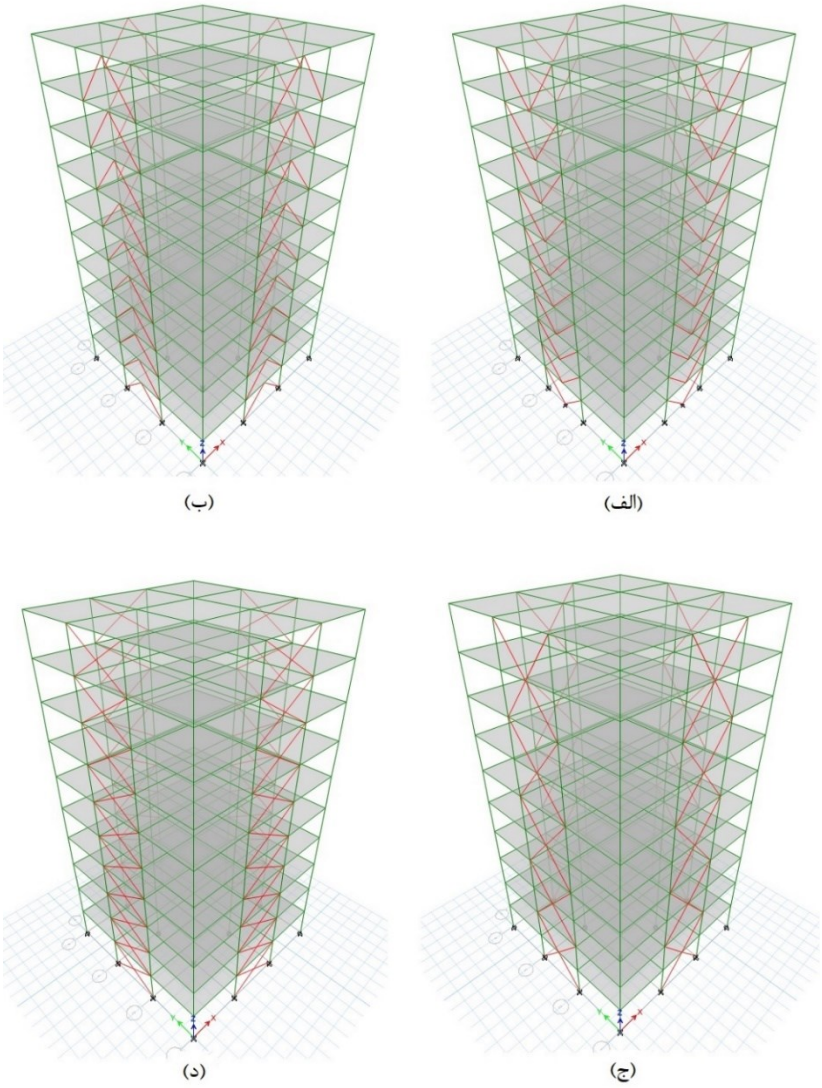
۱۰- جهت طراحی مدل‌ها از آیین نامه طراحی سازه فولادی آمریکا AISC360-10 [۱۴] که بیشترین تطابق با ویرایش چهارم مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [۱۵] دارد، استفاده شده است.

۱۱- در طراحی کلیه مدل‌ها، الزامات طراحی لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی شده همگرای ویژه مندرج در ویرایش چهارم مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [۱۵] و علی‌الخصوص الزامات بند ۱۰-۳-۱۱-۲ مبحث مذکورکه معمولا در طراحی سازه‌های مهاربندی شده با مهاربند همگرای ویژه مورد غفلت واقع می‌شود، رعایت گردید.



شکل ۵: پلان تیپ طبقات تمامی مدل‌ها و موقعیت ستون‌های بررسی شده

[۱] Intermediate Moment Frame
[۲] Special Concentrated Brace Frame



شکل ۶: نمایی از مدل‌های ۱۰ طبقه طراحی شده

الف: مهاربند همگرا شورون هفتی، ب: مهاربند همگرا شورون هشتی ، ج: مهاربند همگرا Split_X، د: مهاربند همگرا X

۳- انجام تحلیل ساخت مرحله‌ای بر روی مدل‌های طراحی شده

در این تحقیق سه مدل ساخت مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل اول همان مدل متعارف است که در آن فرض می‌شود کل سازه در یک مرحله و به صورت آنی ساخته و سپس بارهای ثقلی و جانبی به آن اعمال می‌شود. با توجه به اینکه سازه با سیستم دوگانه قاب خمشی فولادی و مهاربند همگرا، قبل از نصب مهاربندها به واسطه قاب خمشی، قادر به تحمل بارهای ثقلی و لرزه‌ای زمان ساخت می‌باشد، بر اساس روش اجرایی این گونه سازه‌ها، دو مدل ساخت مرحله‌ای نیز به شرح ذیل تعریف گردید.

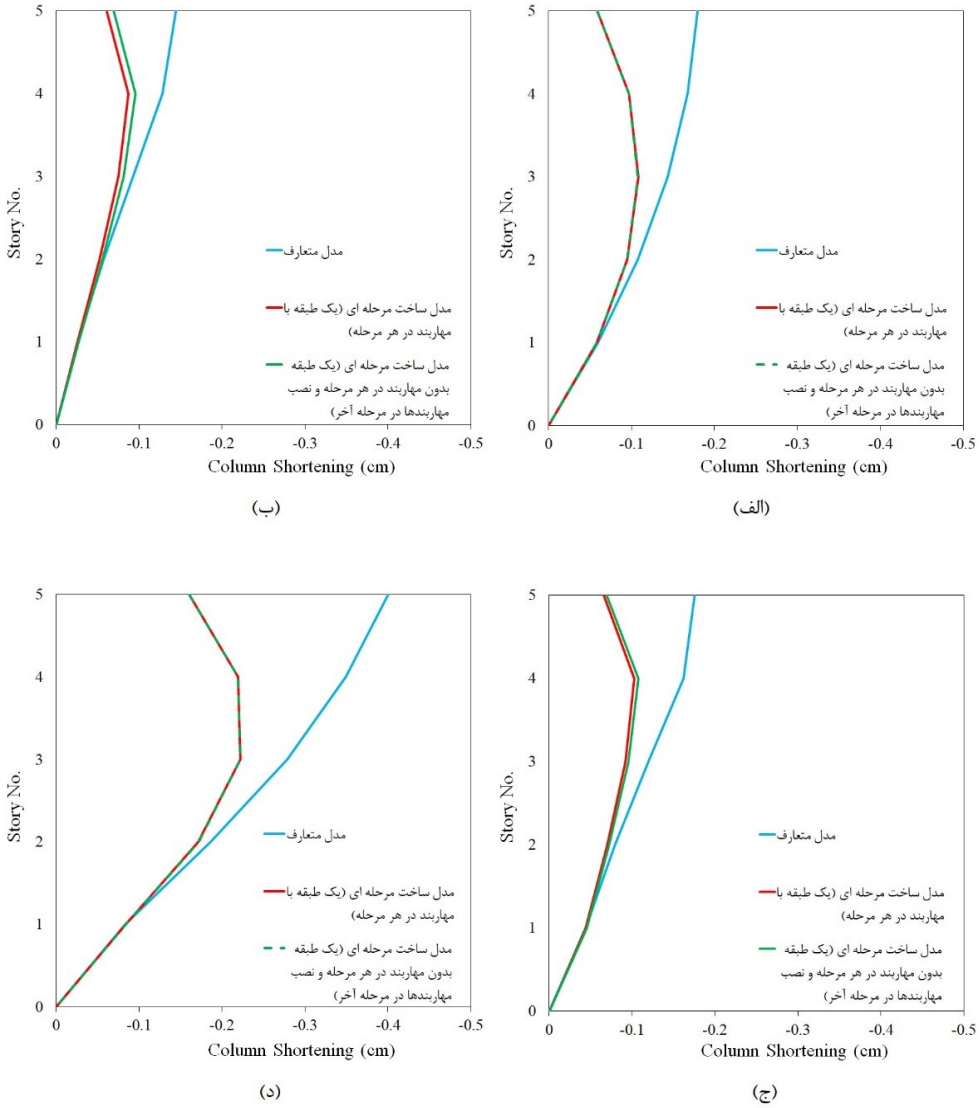
الف) مدل ساخت مرحله‌ای اول (یک طبقه با مهاربند در هر مرحله)

ب) مدل ساخت مرحله‌ای دوم (یک طبقه بدون مهاربند در هر مرحله و نصب مهاربندها در مرحله آخر)

در معرفی مدل‌های ساخت مرحله‌ای در نرم‌افزار ETABS، تنها بار ثقلی مرده سازه، به مدل‌ها در هر مرحله اعمال می‌شود.

۴- نتایج کوتاه‌شدگی ستون‌ها ناشی از بار مرده و تفسیر نتایج

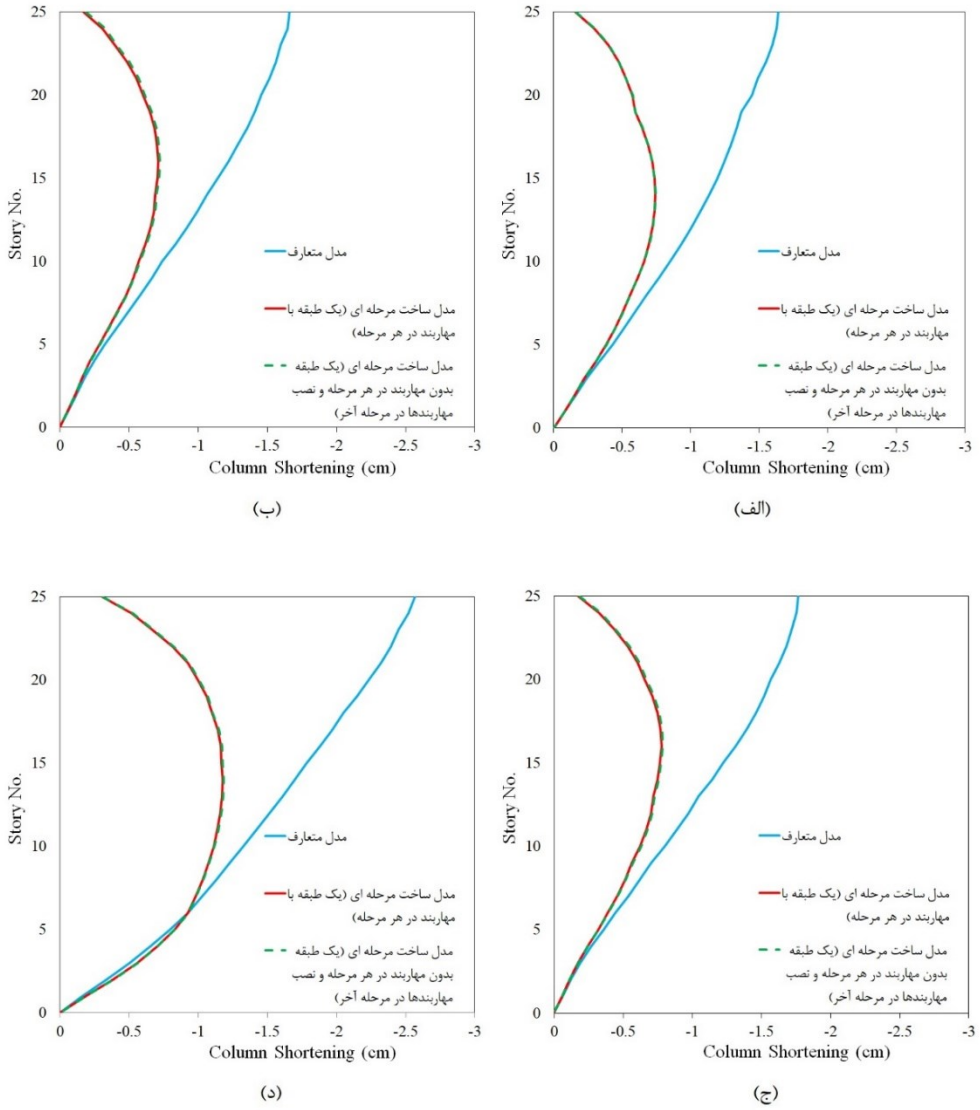
با بررسی و تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از تحقیقات انجام شده مشخص می‌گردد که اصلی‌ترین تفاوت پاسخ سازه در تحلیل متعارف و تحلیل ساخت مرحله‌ای به نمودار کوتاه‌شدگی ستون‌ها برمی‌گردد. مطابق شکل ۴، مقادیر کوتاه‌شدگی در اعضای قائم در تحلیل یک مرحله‌ای یا تحلیل متعارف، روندی رو به رشد در ارتفاع سازه دارد. این 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 تا در طبقات میانی سازه به بیشترین مقدار خود برسد. همانطور که مشاهده می‌شود، نمودار کوتاه‌شدگی ستون‌های مدل ۵ و ۲۵ طبقه با مهاربند شورون هشتی که در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است، منطبق بر نمودار کوتاه‌شدگی شکل ۴ می‌باشد. همچنین به طور کلی، شکل نمودار کوتاه‌شدگی ستون‌ها، فارغ از نوع سیستم مهاربندی و تعداد طبقات بوده و در تمامی ۲۰ مدل مورد بررسی در این تحقیق، شکل نمودار منطبق بر شکل ۴ می‌باشد.



شکل ۷: نمودار کوتاه‌شدگی ستون‌ها ناشی از بار مرده در مدل ۵ طبقه با مهاربند شورون هشتی

الف: ستون گوشه C_1، ب: ستون دهانه مهاربندی با تیر باربر C_2، ج: ستون دهانه مهاربندی با تیر غیر باربر C_5، د: ستون میانی C_6

کد مقاله: IRAST-1027

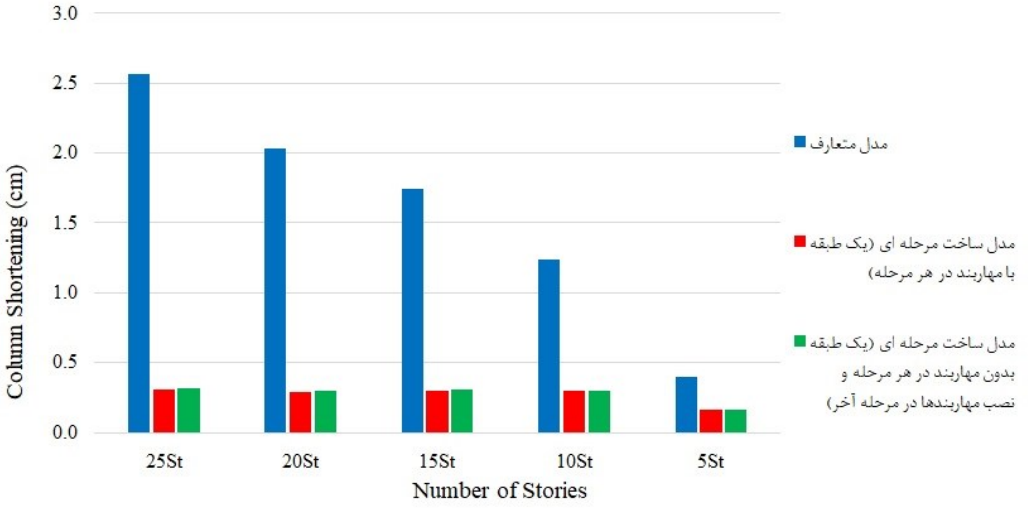


شکل ۸: نمودار کوتاه‌شدگی ستون‌ها ناشی از بار مرده در مدل ۲۵ طبقه با مهاربند شورون هشتی

الف: ستون گوشه C_1، ب: ستون دهانه مهاربندی با تیر باربر C_2، ج: ستون دهانه مهاربندی با تیر غیر باربر C_5، د: ستون میانی C_6

در شکل ۹ نمودار مقایسه کوتاه‌شدگی ستون میانی (C_6) طبقه آخر ناشی از بار مرده در مدل‌های با مهاربند شورون هشتی و در جدول ۱ مقایسه کوتاه‌شدگی ستون میانی (C_6) طبقه آخر ناشی از بار مرده و میزان تغییرات آن نسبت به مدل متعارف در کلیه مدل‌ها ارائه شده است.

کد مقاله: IRAST-1027



شکل ۹: نمودار مقایسه کوتاه شدگی ستون میانی (C_6) طبقه آخر ناشی از بار مرده در مدل های با مهاربند شورون هشتی

جدول ۱: مقایسه کوتاه شدگی ستون میانی (C_6) طبقه آخر ناشی از بار مرده و میزان تغییرات آن نسبت به مدل متعارف

Story	Model	Column Shortening - C_6 (cm)							
		Chevron V Brace		Chevron Inverse V Brace		Split_X Brace		X Brace	
5	مدل متعارف	0.40	0.0%	0.40	0.0%	0.50	0.0%	0.40	0.0%
	مدل ساخت مرحله ای (یک طبقه با مهاربند در هر مرحله)	0.16	-59.7%	0.16	-59.9%	0.20	-59.8%	0.16	-59.8%
	مدل ساخت مرحله ای (یک طبقه بدون مهاربند در هر مرحله و نصب مهاربندها در مرحله آخر)	0.16	-59.6%	0.16	-59.9%	0.20	-59.8%	0.16	-59.8%
10	مدل متعارف	0.95	0.0%	1.24	0.0%	1.21	0.0%	0.95	0.0%
	مدل ساخت مرحله ای (یک طبقه با مهاربند در هر مرحله)	0.23	-76.0%	0.30	-75.9%	0.29	-75.9%	0.23	-76.0%
	مدل ساخت مرحله ای (یک طبقه بدون مهاربند در هر مرحله و نصب مهاربندها در مرحله آخر)	0.23	-75.9%	0.30	-75.9%	0.29	-75.8%	0.23	-76.0%
15	مدل متعارف	1.29	0.0%	1.74	0.0%	1.60	0.0%	1.37	0.0%
	مدل ساخت مرحله ای (یک طبقه با مهاربند در هر مرحله)	0.21	-83.3%	0.30	-82.7%	0.29	-82.2%	0.24	-82.4%
	مدل ساخت مرحله ای (یک طبقه بدون مهاربند در هر مرحله و نصب مهاربندها در مرحله آخر)	0.22	-83.2%	0.30	-82.6%	0.29	-82.0%	0.24	-82.3%
20	مدل متعارف	1.59	0.0%	2.03	0.0%	1.95	0.0%	1.56	0.0%
	مدل ساخت مرحله ای (یک طبقه با مهاربند در هر مرحله)	0.21	-86.5%	0.29	-85.6%	0.28	-85.7%	0.21	-86.4%
	مدل ساخت مرحله ای (یک طبقه بدون مهاربند در هر مرحله و نصب مهاربندها در مرحله آخر)	0.22	-86.3%	0.30	-85.4%	0.28	-85.5%	0.22	-86.2%
25	مدل متعارف	2.02	0.0%	2.57	0.0%	2.37	0.0%	2.45	0.0%
	مدل ساخت مرحله ای (یک طبقه با مهاربند در هر مرحله)	0.24	-88.0%	0.31	-88.0%	0.28	-88.1%	0.30	-87.8%
	مدل ساخت مرحله ای (یک طبقه بدون مهاربند در هر مرحله و نصب مهاربندها در مرحله آخر)	0.25	-87.8%	0.31	-87.8%	0.29	-87.7%	0.31	-87.5%

کد مقاله: IRAST-1027

با مشاهده و بررسی نمودارهای کوتاه‌شدگی ستون‌ها، سوالات زیر مطرح می‌شود که نیازمند پاسخ می‌باشند:

الف: چرا شکل نمودار کوتاه‌شدگی ستون در تحلیل ساخت مرحله‌ای به این صورت است؟

ب: چرا پس از رسیدن به مقدار ماکزیمم خود در طبقات میانی مجدد تا طبقه آخر روند کاهشی دارد؟

ج: چرا میزان کوتاه‌شدگی ستون طبقه آخر که از مجموع کوتاه‌شدگی ستون‌های طبقات زیرین و ستون طبقه آخر ناشی می‌شود و قاعدتا می‌بایست مطابق تحلیل متعارف بیشترین مقدار را داشته باشد، کمترین مقدار را دارد؟

در این تحقیق متعاقباً یک اثبات نادقیق ارائه می‌شود. در پاسخ به سوالات فوق می‌توان توضیحات ذیل را ارائه نمود:

۱- با مطالعه و بررسی مقالات متعدد مشخص می‌شود که شکل مذکور در مقاله آقای چوی[۱] و همکاران [۱۶] ارائه شده و تقریبا تمامی مقالات به استناد این مقاله و نقل قول از آن، تنها به توصیف کیفی شکل پرداخته و توضیح دلیل شکل نمودار کوتاه‌شدگی ستون در تحلیل ساخت مرحله‌ای و علت تفاوت آن با تحلیل متعارف تقریبا در هیچ یک از مقالات عنوان نشده است.

۲- با بررسی‌های انجام شده مشخص گردید، منظور از نمودار کوتاه‌شدگی ستون‌ها که در مقالات به آن اشاره شده است، نمودار تغییرمکان قائم ستون، در هر طبقه است. از سوی دیگر می‌توان هر یک از ستون‌های یک سازه از روی پی تا تراز بام را به صورت یک ستون واحد درنظر گرفت و آنگاه می‌شود فرض کرد که تغییرمکان قائم ستون در هر طبقه، کوتاه‌شدگی ستون واحد فرض شده، باشد.

۳- در تحلیل ساخت مرحله‌ای مطابق توضیحات اجمالی مقالات و سایر منابع، اینگونه فرض می‌شود که در هر مرحله اجرایی، سازه تا تراز واقعی طبقه اجرا می‌شود. به عنوان مثال اگر فرض کنیم ارتفاع هر یک از طبقات یک سازه دو طبقه h باشد، ابتدا طبقه اول در تراز h اجرا می‌شود. پس از اتمام اجرای طبقه اول، فرض شود کوتاه‌شدگی ستون طبقه اول تحت بارهای حین ساخت به میزان δ_1 محاسبه گردد. در شروع مدل‌سازی طبقه دوم، ستون طبقه دوم به اندازه $h+\delta_1$ مدل می‌شود تا سقف طبقه دوم دقیقا در تراز 2h قرار گیرد. این موجب می‌شود تغییرمکان قائم ستون طبقات زیرین در مراحل قبلی ساخت، در تغییرمکان قائم ستون طبقه جدید لحاظ نشود. در نتیجه می‌توان گفت این فرض، دلیل شکل نمودار کوتاه‌شدگی ستون در روش تحلیل ساخت مرحله‌ای است.

نکته: فرض مذکور در سازه‌های بتنی و یا پل‌ها که رعایت کدهای ارتفاعی در آن‌ها حائز اهمیت می‌باشد، منطقی است اما در سازه‌های فولادی منطقی و اجرایی بنظر نمی‌رسد.

۴- جهت روشن شدن موضوع، کوتاه‌شدگی یک مدل ۵ طبقه که به‌صورت یک طبقه در هر مرحله ساخت تحلیل می‌شود را بصورت تقریبی و پارامتریک بررسی می‌نماییم. لذا فرض می‌کنیم که تغییرمکان قائم هر طبقه ناشی از بار ثقلی آن طبقه حدود δ است.

- با توجه به اینکه سقف طبقه اول، ۵ مرحله ساخت مرحله‌ای را تجربه می‌کند (۱- اجرای طبقه اول، ۲- اجرای طبقه دوم، ۳- اجرای طبقه سوم، ۴- اجرای طبقه چهارم و ۵- اجرا طبقه پنجم)، لذا به میزان 5δ جابجایی قائم پیدا می‌کند.
- سقف طبقه دوم، ۴ مرحله ساخت مرحله‌ای را تجربه کرده و چون طبقه دوم نیز هست، در هر مرحله 2δ (یک δ ناشی از خود طبقه و یک δ ناشی از طبقه اول) جابجا می‌شود. لذا در نهایت به اندازه $4*2\delta=8\delta$ بصورت قائم جابجا می‌شود.
- سقف طبقه سوم، ۳ مرحله ساخت مرحله‌ای را تجربه کرده و چون طبقه سوم نیز هست، در هر مرحله 3δ جابجا می‌شود. لذا در نهایت به اندازه $3*3\delta=9\delta$ بصورت قائم جابجا می‌شود.
- سقف طبقه چهارم، ۲ مرحله ساخت مرحله‌ای را تجربه کرده و چون طبقه چهارم نیز هست، در هر مرحله 4δ جابجا می‌شود لذا در نهایت به اندازه $2*4\delta=8\delta$ بصورت قائم جابجا می‌شود.
- در انتها سقف طبقه پنجم که در تراز واقعی اجرا شده است، فقط به اندازه یک مرحله ساخت مرحله‌ای را تجربه کرده و چون طبقه پنجم هست، در هر مرحله 5δ جابجا می‌شود. لذا به اندازه $1*5\delta=5\delta$ بصورت قائم جابجا می‌شود.

از محاسبه تقریبی کوتاه‌شدگی ستون‌ها که بصورت فوق بدست آمده است نتایج ذیل حاصل می‌شود:

[۱] Choi

- تغییرمکان قائم طبقات که متناظر کوتاه‌شدگی ستون‌ها می‌باشد، از طبقه ۱ تا طبقه ۳ صعودی و بعد از آن نزولی می‌باشد.
- اگر تغییرمکان قائم یک طبقه ناشی از بار ثقلی آن طبقه را δ، تعداد کل طبقات را N و شماره هر طبقه را S فرض کنیم، تغییرمکان قائم هر طبقه در پایان تحلیل ساخت مرحله‌ای (N مرحله ساخت)، که با Δ_h نمایش داده می‌شود برابر است با:

$$\Delta_h=S(N-S+1)\delta \quad (۱)$$

رابطه ۱ را می‌توان به صورت حاصل‌ضرب دو متغیر S و (N-S+1) در مقدار ثابت δ در نظر گرفت. مطابق قوانین ریاضیات در صورتی‌که حاصل‌جمع دو متغیر، مقدار ثابتی باشد آنگاه حاصل‌ضرب آن‌ها زمانی ماکزیمم خواهد بود که دو متغیر با یکدیگر برابر باشند. با توجه به اینکه حاصل‌جمع دو متغیر فوق، N+1 می شود و این مقدار نیز ثابت است، لذا تغییرمکان قائم در پایان ساخت مرحله‌ای زمانی حداکثر خواهد باشد که دو متغیر فوق با یکدیگر برابر باشند، لذا داریم:

$$S = (N-S+1) \rightarrow 2S = N+1 \rightarrow S = (N+1)/2 \quad (۲)$$

رابطه ۲ نشان می‌دهد در صورتی‌که تعداد طبقات سازه فرد باشد، حداکثر تغییرمکان قائم در پایان ساخت مرحله‌ای، در طبقه میانی اتفاق می‌افتد و اگر تعداد طبقات زوج باشد، حداکثر تغییرمکان قائم در پایان ساخت مرحله‌ای، در وسط ارتفاع سازه که بین دو طبقه میانی می‌باشد، رخ خواهد داد.

همچنین از رابطه ۱ و نتایج بدست آمده مشخص می‌شود که تغییرمکان قائم ستون طبقه اول و آخر یا تغییرمکان قائم ستون طبقه دوم و ماقبل آخر و ....، با یکدیگر تقریبا برابرند و این نشان می‌دهد که نمودار تغییرمکان قائم ستون طبقات نسبت به طبقه وسط تقریبا متقارن است.

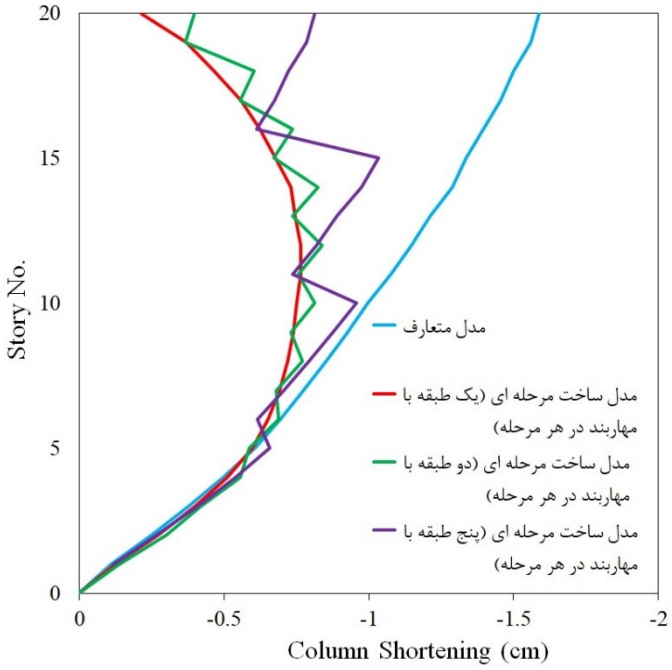
جهت صحت سنجی استدلال فوق و بررسی اثر فرآیند ساخت مرحله‌ای بر نمودار کوتاه‌شدگی ستون‌ها، مدل ۲۰ طبقه با مهاربند شورون هفتی با حالات متفاوت ساخت مرحله‌ای به شرح ذیل نیز تحلیل گردید:

۱- یک طبقه با مهاربند در هر مرحله.

۲- دو طبقه با مهاربند در هر مرحله.

۳- پنج طبقه با مهاربند در هر مرحله.

نتایج کوتاه‌شدگی ستون میانی (C_6) ناشی از بار مرده مدل مذکور، در شکل ۱۰ ارائه شده است. همانطور که از شکل مذکور مشاهده می‌شود، در اولین گام از مرحله بعدی ساخت، اولین ستون در تراز واقعی طبقه مدل می‌شود و عملا کل تغییرمکان قائم ستون‌های زیر آن با افزایش طول ستون جدید خنثی می‌شود. به عنوان مثال در مدل ساخت مرحله‌ای (پنج طبقه با مهاربند در هر مرحله)، در پایان مرحله سوم ساخت، ۱۵ طبقه ساخته می‌شود و کوتاه‌شدگی ستون میانی (C_6) حدود ۱ سانتی‌متر خواهد بود. با شروع مرحله چهارم ساخت، ستون طبقه ۱۶ با طول بیشتری مدل می‌شود، به طوری طبقه ۱۶ در تراز واقعی آن اجرا شود و سپس ۴ طبقه بعدی بر روی آن قرار می‌گیرد. همچنین از شکل مذکور مشاهده می‌شود در صورتیکه تعداد طبقات ساخته شده در هر مرحله افزایش یابد، تاثیر ساخت مرحله‌ای بر کوتاه‌شدگی ستون‌ها کاهش یافته و نمودار کوتاه‌شدگی مدل ساخت مرحله‌ای به مدل متعارف نزدیکتر می‌شود.



شکل ۱۰: نمودار تغییرات کوتاه‌شدگی ستون میانی (C_6) ناشی از بار مرده در مدل ۲۰ طبقه با مهاربند شورون هفتی تحت حالت‌های متفاوت ساخت مرحله‌ای

۵- نتیجه گیری

مطابق توضیحات ارائه شده در بخش مطالعه و تفسیر نتایج، خلاصه نتایج این تحقیق در خصوص اثرات ساخت مرحله‌ای بر کوتاه‌شدگی ستون‌ها در قاب‌های فولادی دوگانه دارای مهاربندی همگرا شورون هفتی، شورون هشتی، Split_X و X را می‌توان به صورت ذیل بیان کرد:

۱- مقادیر کوتاه‌شدگی ستون‌ها در کلیه مدل‌های مورد بررسی در این تحقیق، در تحلیل یک مرحله‌ای یا تحلیل متعارف، روندی رو به رشد در ارتفاع سازه دارد. در صورتیکه در تحلیل ساخت مرحله‌ای و اعمال تدریجی بارها، از روند رو به رشد آن در ارتفاع به مراتب کاسته می‌شود تا در طبقات میانی سازه به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

۲- دلیل شکل نمودار کوتاه‌شدگی ستون‌ها به شرح نتیجه گیری شماره ۱، ناشی از این فرض می‌باشد که در ساخت مرحله‌ای، در هر مرحله اجرایی، سازه تا تراز واقعی طبقه اجرا می‌شود. این موجب می‌شود تغییرمکان قائم ستون طبقات زیرین در مراحل قبلی ساخت، در تغییرمکان قائم ستون طبقه جدید لحاظ نشود.

۳- به صورت یک اثبات ریاضی نادقیق، اگر تغییرمکان قائم یک طبقه ناشی از بار ثقلی آن طبقه را δ، تعداد کل طبقات را N و شماره هر طبقه را S فرض کنیم، تغییرمکان قائم هر طبقه در پایان تحلیل ساخت مرحله‌ای (N مرحله ساخت)، که با Δ_h نمایش داده می‌شود از رابطه تقریبی ذیل محاسبه می‌شود:

$$\Delta_h=S(N-S+1)\delta \qquad (۱)$$

۴- از رابطه ۱ نیز نتیجه می‌شود، در صورتی‌که تعداد طبقات سازه فرد باشد، حداکثر تغییرمکان قائم در پایان ساخت مرحله‌ای، در طبقه میانی اتفاق می‌افتد و اگر تعداد طبقات زوج باشد، حداکثر تغییرمکان قائم در پایان ساخت مرحله‌ای، در وسط ارتفاع سازه که بین دو طبقه میانی می‌باشد، رخ خواهد داد.

۵- در صورتیکه تعداد طبقات ساخته شده در هر مرحله افزایش یابد، تاثیر ساخت مرحله‌ای بر کوتاه‌شدگی ستون‌ها کاهش یافته و نمودار کوتاه‌شدگی مدل ساخت مرحله‌ای به مدل متعارف نزدیکتر می‌شود.

مراجع

[1] Panigrahi, S. Patil, V. Madan, S. Takkalaki, S. (2019). Importance of Construction Sequence Analysis in Design of High Rise Buildings. *International Journal of Innovative Science - IJISET,* vol. 6, no. 4.

[2] Dinar, Y. Rasel, M. Chowdhury, M. Ashraf, M. (2014). Chronological Construction Sequence Effects on Reinforced Concrete and Steel Buildings. *The International Journal Of Engineering And Science - IJES,* vol. 3, no. 1, pp. 52-63, 2014.

[3] Choi, C. Kim, E. (1985). Multistory Frames Under Sequential Gravity Loads. *Journal of Structural Engineering ASCE.*

[4] Das, G. KI, P. (2013). Comprasion of Conventional and Construction Analysis of a RCC Building. *International Journal of Science Technology and Engineering - IJSTE,* vol. 3, no. 3.

[5] Rao, J. Babu, D. Selvan, M. Kumar, V. (2016). Study and Comparision of Construction Sequence Analysis with Regular Analysis By Etabs. *Civil Engineering International Journal - CEIJ,* vol. 2.

[6] Amin, S. Mahajan, S. (2015). Analysis Of Multi Storied Rcc Building For Construction Sequence Loading. *International Journal of Modern Trend in Engineering and Research.*

[7] Shirhatti, T. Vanakudre, S. (2015). The Effects of P-delta and Construction Sequential Analysis of Rcc and Steel Building with Respect to Linear Static Analysis. *International Research Journal of Engineering and Technology - IRJET,* vol. 2, no. 4.

[8] Pranay, R. Sreevalli, Y. Thota, E. Kumar, S. (2015). Study and Comparison of Construction Sequence Analysis with Conventional Lumped Analysis Using Etabs. *Civil Engineering Systems and Sustainable Innovations.*

[9] Jagarlamudi, V. Manoj, K. (2015). Study and Comparison of Sequence Analysis with Conventional Lumped Analysis Using ETABS. *International Journal and Magazine of Engineering, Technology, Management and Research.*

[10] Pathan, K. Ali, S. Khan, H. Mirza, M. Waseem , M. Zubair, S. (2014). Construction Stage Analysis of RCC Frames. *International Journal of Engineering and Technology Research,* vol. 2, no. 3.

[11] ETABS 19.0.1 user manual.

[12] Iranian National Building Code. Part 6th .Design Loads for Buildings. 2013.

[13] Iranian Building Codes And Standards. Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings. Standard No.2800. 4th Edition. 2014.

[14] AISC. Specification For Structural Steel Buildings. ANSI/AISC360-10. Chicago, American Institute of Steel Construction. 2010.

[15] Iranian National Building Code. Part 10th. Design and Construction of steel buildings. 2013.

[16] Choi, C. Chung, H. Lee, L. Wilson, E. (1992). Simplied Building Analysis with Equential Dead Loads-CFM. *Journal of Structural Engineering - ASCE.*