



روش ساده آنالیز کوتاه‌شدگی وابسته به زمان ستون در سازه‌های قابی بتن‌آرمه

محمد جلیل زاده افشاری^{*}، علی خیرالدین

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۶ اسفند ۱۳۹۵
بازنگری: ۲۷ مرداد ۱۳۹۶
پذیرش: ۱ آبان ۱۳۹۶
ارائه آنالیز: ۱۰ آبان ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

آنالیز غیرخطی مرحله‌ای
آنالیز متداول
کوتاه‌شدگی ستون
خزش
آبرفتگی
رشد زمانی مدول الاستیسیته
پدیده‌های وابسته به زمان بتن

چکیده: کوتاه‌شدگی تجمعی ستون‌ها در آنالیزهای یک مرحله‌ای متداول سازه، مهم‌ترین شاخصه‌ای است که غفلت از رفتار واقعی ستون‌ها، که تنها با اعمال مرحله ای بارهای ثقلی و لحاظ کرنش‌های غیر الاستیک دراز مدت بتن حاصل می‌شود، در پی خواهد داشت. از این رو، توجه به تطابق طراحی سازه‌های بلند بتن آرمه و مراحل عملی اجرا، از طریق آنالیز غیر خطی مرحله‌ای با در نظر گرفتن رفتار دراز مدت بتن، همواره در سال‌های اخیر مورد توصیه اکید پژوهشگران بوده امشخصات تا بدین وسیله از اثرات نامطلوب سازه‌های احتمالی مانند اضافه لنگرهای اعمالی به اعضای افقی ناشی از تغییر شکل‌های محوری متفاوت اعضای مجاور و گسترش ترک در اعضای غیر سازه‌ای در پانل‌های با نشست‌های ثقلی نا همگون و عدم استفاده از ظرفیت در نظر گرفته شده در طراحی اعضای سازه جلوگیری شود. در این مقاله با انجام مدلسازی و آنالیزهای غیرخطی مرحله‌ای گسترده بر روی سازه‌هایی با مشخصات هندسی مختلف، روابط تجربی بسیار ساده جهت تخمین کوتاه‌شدگی ستون‌ها ناشی از خزش، آبرفتگی و تغییرات زمانی مدول الاستیسیته بتن، به گونه‌ای که مستقل از پارامترهای مرسوم روش CEB-FIP در تخمین کرنش‌های محوری مذکور باشد، ارائه شده است. نتایج حاصل از صحت سنجی روابط پیشنهادی نشان از انطباق بسیار مطلوب تمامی روابط پیشنهادی تا ۳۰ طبقه و نیز صحت رابطه پیشنهادی آبرفتگی حتی برای سازه‌های قابی بلندتر از محدوده مورد بررسی تحقیق حاضر دارد.

۱- مقدمه

۱-۱- تاریخچه تحقیقات

اصولاً در تحلیل‌های متعارف سازه‌ای کل طبقات سازه به طور همزمان تحت اثر بارهای مرده و زنده قرار می‌گیرند. در حالی که بارگذاری بارهای مرده ناشی از وزن مرده سازه و کفسازی همزمان با پیشرفت مراحل ساخت و مطابق با برنامه اجرایی سازه، به تدریج به اعضای ساخته شده در مراحل قبلی اعمال می‌شوند که این امر به نحوه ساخت سازه و ترتیبات اجرایی آن بستگی دارد [۱]. از طرفی پر واضح است که بار مرده اعضای اضافه شده به سازه طی مراحل ساخت، توسط همان بخشی از سازه که تا آن لحظه موجود می‌باشد تحمل می‌گردد. بنابراین توزیع تنش‌ها و تغییر مکان‌های ناشی از بار اعضای موجود در هر لحظه از ساخت سازه، مستقل از اندازه، خواص و حضور بقیه اعضایی است که هنوز وارد مراحل ساخت نشده‌اند [۲]. از جمله افرادی که طی تحقیقاتشان به بررسی مسأله فوق پرداختند می‌توان به چوی^۱ و کیم^۲ (۱۹۸۵) اشاره کرد که مسأله توالی ساخت را با مفهوم طبقه فعال، وارد آنالیز سازه نمودند [۳]. اصول روش آنالیز طبقه فعال بر مبنای سه مفهوم طبقه فعال، طبقه غیرفعال و طبقات ساخته نشده و روندی با جهت معکوس روند

واقعی ساخت یعنی از بالا به پایین و انجام آنالیز به تعداد طبقات سازه استوار است. جهت کاهش تعداد و حجم محاسبات و صرف زمان کمتر، استفاده از تکنیک زیرسازه، می‌تواند مثرم ثمر واقع شود [۴ و ۵]. چوی، چانگ^۳، لی^۴ و ویلسون^۵ در سال ۱۹۹۲ با ارائه روش ساده و شبیه‌ساز رفتار واقعی سازه منطبق بر مراحل عملی ساخت، تحت عنوان ضرایب اصلاح (CFM)، اثرات توالی ساخت را در تحلیل سازه لحاظ نمودند [۶]. روش مذکور قادر است تا نتایج حاصل از آنالیز متداول کلی و یک مرحله‌ای سازه را تنها با استفاده از ضرایب اصلاح و بدون نیاز به انجام آنالیز دقیق و زمان بر مرحله‌ای، اصلاح نموده و اثرات توالی ساخت سازه را در برآورد نیروهای داخلی اعضا، وارد آنالیز نماید.

از طرف دیگر، نتایج و تجربیات متعدد نشان می‌دهد که اصولاً سازه‌های بتنی، به واسطه پدیده‌های خزش و جمع‌شدگی در دراز مدت تغییر شکل‌ها و یا حتی اضافه تنش‌های زیادی را متحمل می‌شوند. یکی از کلیدی‌ترین و مهم‌ترین نتایج این مسأله تشدید کوتاه‌شدگی تجمعی ستون‌ها در آنالیزهای متداول و یک مرحله‌ای سازه است که نه تنها منجر به تحمیل لنگرهای اضافی در اعضای سازه‌ای افقی نظیر تیرها ناشی از تغییر شکل‌های محوری

^{*}نویسنده عهده‌دار مکاتبات: jalilzadeh.afshari@semnan.ac.ir

و یا غیر مستقیم دخالت دارند که می‌بایست در قالب آنالیز توالی ساخت و وارد کردن تقدم و تأخر برنامه ساخت در طراحی ساختمان‌های بلند مرتبه بتن آرمه مدنظر قرار گیرند.

هدف این مقاله برآورد دقیق میزان کوتاه‌شدگی ستون در سیستم‌های سازه‌ای قاب خمشی طرح شده با شکل‌پذیری ویژه، با استفاده از روابط تجربی بسیار ساده و مستقل از مشخصات هندسی مرسوم در تخمین کرنش‌های محوری وابسته به زمان بتن، مانند بعد نظری^۹ اعضا است. روابط پیشنهادی تحقیق حاضر، ضمن تخمین دقیق و منطبق مقادیر کوتاه‌شدگی ناشی از خزش، آبرفتگی و تغییرات زمانی مقاومت فشاری مشخصه و مدول الاستیسیته بر مقادیر متناظر از آنالیز دقیق غیرخطی مرحله‌ای، طیف وسیعی از سازه‌های قابی شکل‌پذیر با مشخصات هندسی و ارتفاعی متفاوت را در بر گرفته و تنها برای سازه‌هایی معتبر خواهند بود که به صورت بهینه و اپتیموم و مطابق ضوابط آیین نامه ACI318-14 [۱۹] و نیروهای داخلی ناشی از آنالیز متداول و یک مرحله‌ای کلی سازه و بدون لحاظ اثرات دراز مدت و کرنش‌های وابسته به زمان بتن طرح شده باشند. در این صورت روش تحقیق حاضر قادر است تا بدون هیچگونه نیاز به انجام آنالیز غیرخطی مرحله‌ای و تعریف پارامترهای مؤثر مربوطه، رفتار دراز مدت سازه در قالب کوتاه‌شدگی‌های خزشی، آبرفتگی و الاستیک هر ستون دلخواه از سازه را در هزارمین روز ساخت (به عنوان شاخص زمانی که در آن کرنش‌های غیر الاستیک بتن تقریباً به مقدار نهائی خود رسیده‌اند)، با استفاده از روابط پیشنهادی که تنها تابعی از طول ستون (h)، طول دهانه (l)، تعداد طبقات سازه (n) و شماره طبقه مورد نظر (i) می‌باشند، مطابق ضوابط CEB-FIP90 [۲۰] پیش‌بینی نماید.

۱-۲- مروری بر ضوابط CEB-FIP 1990

آیین‌نامه CEB-FIP یکی از قدیمی‌ترین و معتبرترین روش‌های شناخته شده در خصوص برآورد رفتار دراز مدت بتن است که به دلیل سادگی روابط و روند محاسبات، به طور قابل ملاحظه‌ای مورد استفاده پژوهشگران قرار دارد. در این روش چگونگی رشد مقاومت فشاری میانگین و مدول الاستیسیته بتن به ترتیب از روابط ۱ و ۲ حاصل می‌شود.

$$f_{cm}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \times f_{cm} \quad (1)$$

$$E_{ci}(t) = \sqrt{\exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\}} \times E_{ci} \quad (2)$$

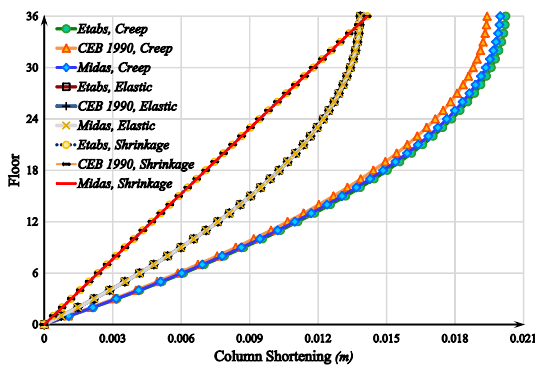
که در آن f_{cm} و E_{ci} به ترتیب مقاومت فشاری میانگین و مدول الاستیسیته در سن ۲۸ روز، t سن بتن بر حسب روز و s ضریب وابسته به نوع سیمان است [۲۰] که برای سیمان‌های نرمال مقدار ۰/۲۵ خواهد داشت. در محدوده‌ای که قدر مطلق تنش محوری کوچک‌تر از ۰/۴ مقاومت

متفاوت اعضای سازه‌ای مجاور می‌شود، بلکه خطای موجود در برآورد تغییرشکل‌های ثقلی المان‌های عمودی ناشی از انتخاب غلط نوع آنالیز، می‌تواند منجر به گسترش ترک‌های پیش رونده در میانقاب‌ها یا اعضای غیر سازه‌ای برخی پانل‌ها با تغییر شکل‌های ثقلی ناهمگون گردد. از این رو تنها راه اجتناب از اثرات نامطلوب نامبرده، پیش‌بینی رفتار واقعی سازه است که تنها از طریق انجام آنالیز غیر خطی مرحله‌ای و با در نظر گرفتن کلیه کرنش‌های الاستیک و غیر الاستیک دراز مدت بتن میسر می‌گردد. از جمله پژوهشگرانی که طی تحقیقاتشان به مسأله فوق پرداخته‌اند می‌توان به کیم و همکاران^۱ در سال ۲۰۱۲ اشاره نمود که الگوریتم آنالیز دو مرحله‌ای را جهت تخمین دقیق کوتاه‌شدگی ستون‌ها مطرح نمودند [۷]. ایشان در سال ۲۰۱۳ و ۲۰۱۵ به ترتیب اثر مقیدکنندگی اعضای افقی و توزیع بهینه آرماتورگذاری را در کاهش میزان کوتاه‌شدگی مورد بررسی قرار دادند [۸ و ۹]. شارما و همکاران^۲ در سال ۲۰۰۹ اثر سختی تیر و آرماتور ستون را در رفتار خزشی و آبرفتگی سازه‌های قابی مورد مطالعه قرار دادند [۱۰]. انجومو و ازی^۳ در سال ۲۰۱۴ و پارک و همکاران^۴ در سال ۲۰۱۳ از جمله افرادی هستند که با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک سعی در حداقل نمودن کوتاه‌شدگی ستون داشته‌اند [۱۱ و ۱۲]. موراگاسپیتیا و همکاران^۵ در سال ۲۰۱۰ مدلی عددی جهت برآورد دقیق میزان کوتاه‌شدگی‌های محوری سازه‌های بتنی با در نظر گرفتن پدیده‌های وابسته به زمان بتن ارائه دادند [۱۳]. لوو و همکاران^۶ نیز در سال ۲۰۱۳ به بررسی رفتار دراز مدت سیستم‌های سازه‌ای کامپوزیتی پرداختند [۱۴]. جلیل زاده افشاری و همکاران در سال ۲۰۱۸ در پژوهش خود به بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر خزش و آبرفتگی سازه‌های بتنی تحت آنالیز غیرخطی مرحله‌ای پرداختند [۱۵]. جلیل‌زاده افشاری و همکاران در سال ۲۰۱۷ روشی ساده برای اعمال اثرات توالی ساخت در آنالیز سازه را در قالب ارائه مدلی جدید با مفهوم کاهش سختی محوری ستون، معرفی نمودند [۱۶]. علاوه بر موارد یاد شده، غفلت از آنالیز غیر خطی مرحله‌ای سازه و عدم توجه به ماهیت اعمال مرحله‌ای بارهای ثقلی می‌تواند منجر به بروز مشکلات عدیده در تحلیل و طراحی سازه‌های بلند مرتبه گردد. (سافارینی^۷ و ویلسون ۱۹۸۳ [۱۷]، کواک^۸ و کیم ۲۰۰۶ [۲]) از جمله این مسائل می‌توان به افزایش خیز تیرهای بتنی، گسترش ترک در نواحی کششی المان‌های بتنی و عدم استفاده از ظرفیت در نظر گرفته شده در طراحی اعضای سازه [۱۸] به عنوان اثرات نامطلوبی اشاره کرد که در نظر گرفتن پدیده‌های وابسته به زمان سازه‌های بتنی، نظیر خزش و آبرفتگی، منجر به تشدید آنها نیز می‌گردند. تمامی این پدیده‌ها به نوعی در تغییر رفتار سازه به صورت مستقیم

- 1 Kim et al.
- 2 Sharma et al.
- 3 Njomo and Ozay
- 4 Park et al.
- 5 Moragaspiya et al.
- 6 Lu et al.
- 7 Saffarini
- 8 Kwak

کوتاه‌شدگی خزشی، آبرفتگی و تغییرات مدول الاستیسیته در سه حالت نتایج نرم‌افزاری ETABS 2015، محاسبات دستی بر مبنای ضوابط CEB-FIP 90 و نتایج حاصل از نرم‌افزار Midas Gen 2015 به منظور صحت سنجی اولیه و کالیبراسیون خطا مهیا می‌گردد. مشخصات مثال مورد بررسی به قرار زیر است:

ستون داخلی سازه ۳۶ طبقه با ابعاد ۰/۵ متر × ۱/۲۵ متر و ارتفاع طبقه ۲/۷۴ متر مد نظر است. بار مرده محوری ستون‌ها در کلیه طبقات ۱۶۵ کیلو نیوتن، مقاومت فشاری مشخصه بتن ۲۵ مگاپاسکال و متعاقباً مدول الاستیسیته بتن برابر ۳۲۰۰۹/۳۲ مگاپاسکال است. مدت زمان ساخت طبقات ۷ روز، سیمان مورد استفاده از نوع نرمال، رطوبت محیط ۵۰ درصد، شروع آبرفتگی با پایان دوره عمل‌آوری مرطوب برابر ۳ روز و سن بارگذاری طبقات به جهت راحتی محاسبات برابر ۲۵۲ روز یعنی پس از اتمام ساخت آخرین طبقه و مطابق آنالیز متداول کلی و یک مرحله‌ای سازه فرض می‌شود. روابط ۱ تا ۶ جهت محاسبات دستی کوتاه‌شدگی‌های ناشی از خزش و آبرفتگی ستون مورد بررسی، مورد استفاده بوده است. نتایج نهائی حاصل از محاسبات دستی به روش ضوابط CEB-FIP و نتایج متناظر نرم‌افزارهای ETABS و Midas Gen در خصوص کوتاه‌شدگی ستون مذکور ناشی از اثرات خزش و آبرفتگی و مدول الاستیسیته، در روز ۱۰۰۰ ام ساخت در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین خطای رخ داده نسبت به مقدار واقعی در برآورد رفتار خزشی ستون بوده که متوسط آن برای نرم‌افزارهای Midas Gen و ETABS به ترتیب برابر با ۲/۸۷ درصد و ۴/۰۶ درصد گزارش شده است. انطباق کامل منحنی‌های کوتاه‌شدگی الاستیک و انطباق بسیار مناسب منحنی‌های کوتاه‌شدگی خزشی و آبرفتگی تحت سه حالت مورد بررسی مؤید صحت محاسبات و عملکرد نرم‌افزار مورد استفاده تحقیق حاضر (ETABS) است.



شکل ۱: مقایسه مقادیر کوتاه‌شدگی تحت سه حالت مورد بررسی

Fig. 1. Comparison of shortening values in three evaluated modes

۲- مدل‌سازی

جهت نیل به هدف مقاله حاضر و حصول روابط ساده پیش‌بینی‌کننده رفتار دراز مدت و مرحله‌ای سازه، مدل‌سازی‌های متنوعی با شرایط هندسی

فشاری میانگین ۲۸ روزه بتن باشد، رابطه کرنش خزشی و تنش خطی می‌باشد. در این حالت کرنش خزشی $\varepsilon_{cs}(t, t_0)$ وابسته به تنش ثابت، مطابق رابطه ۳ خواهد بود [۲۰].

$$\dot{\alpha}_c(t, t_0) = \dot{\alpha}_c(t_0) \left[\frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\ddot{\alpha}(t, t_0)}{E_{ci}} \right] = \dot{\alpha}_c(t_0) J(t, t_0) \quad (3)$$

که در آن $E_c(t_0)$ ، مدول الاستیسیته در زمان بارگذاری و $1/E_c(t_0)$ ، بیانگر کرنش اولیه بر واحد تنش و $J(t, t_0)$ ، تابع خزش یا تابع انطباق و مبین کرنش وابسته به تنش بر واحد تنش است. ضریب بی بعد خزش $\varphi(t, t_0)$ ، از رابطه ۴ قابل محاسبه می‌باشد.

$$\varphi(t, t_0) = \left(1 + \frac{1 - RH/100}{0.46(h/100)^{1/3}} \right) \cdot \left[\frac{5.3}{(f_{cm}/10)^{0.5}} \right] \cdot \left(\frac{1}{0.1 + t_0^{0.2}} \right) \cdot \left\{ \frac{(t - t_0)}{\left(\left[150 \left[1 + (1.2 \frac{RH}{100})^{18} \right] \frac{h}{100} + 250 \right) + (t - t_0) \right)} \right\}^{0.3} \quad (4)$$

کرنش آبرفتگی یا تورمی $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ ، مطابق رابطه ۵ محاسبه می‌شود [۲۰].

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = [160 + 10\beta_{sc}(9 - f_{cm}/10)] \times 10^{-6} \cdot \left[-1.55 \left[1 - \left(\frac{RH}{100} \right)^3 \right] \right] \cdot \left[\frac{t - t_s}{0.035h^2 + t - t_s} \right]^{0.5} \quad (5)$$

در روابط فوق، t_0 سن بتن (به روز) در زمان بارگذاری، t_s سن بتن (به روز) در زمان شروع آبرفتگی یا تورم است که با پایان دوره عمل‌آوری مرطوب شروع می‌شود، RH درصد رطوبت محیط، β_{sc} ضریب وابسته به نوع سیمان مصرفی است [۲۰] که برای سیمان‌های نرمال یا زودگیر برابر ۵ می‌باشد و h بعد نظری عضو بر حسب میلی‌متر می‌باشد که از رابطه ۶ حاصل می‌شود.

$$h = 2A_c / u \quad (6)$$

که در آن A_c سطح مقطع عضو و u محیط عضو در تماس با اتمسفر می‌باشد.

۱-۳- اعتبار سنجی مدل‌سازی

کلیه عملیات تحلیل و طراحی جهت استخراج روابط پیشنهادی تحقیق حاضر در نرم‌افزار ETABS 2015 [۲۱] انجام شده است. از این رو برای اطمینان از صحت عملکرد نرم‌افزار، مثال شاخص روش فینتل^۱ و خان^۲ [۲۲] با اعمال تغییراتی اندک در برخی از فرضیات مثال مذکور به جهت پیاده‌سازی ضوابط CEB-FIP 90 و تطابق با فرضیات اولیه تحقیق حاضر، انتخاب شده است. با بکارگیری نرم‌افزار Midas Gen 2015 [۲۳] امکان مقایسه مقادیر

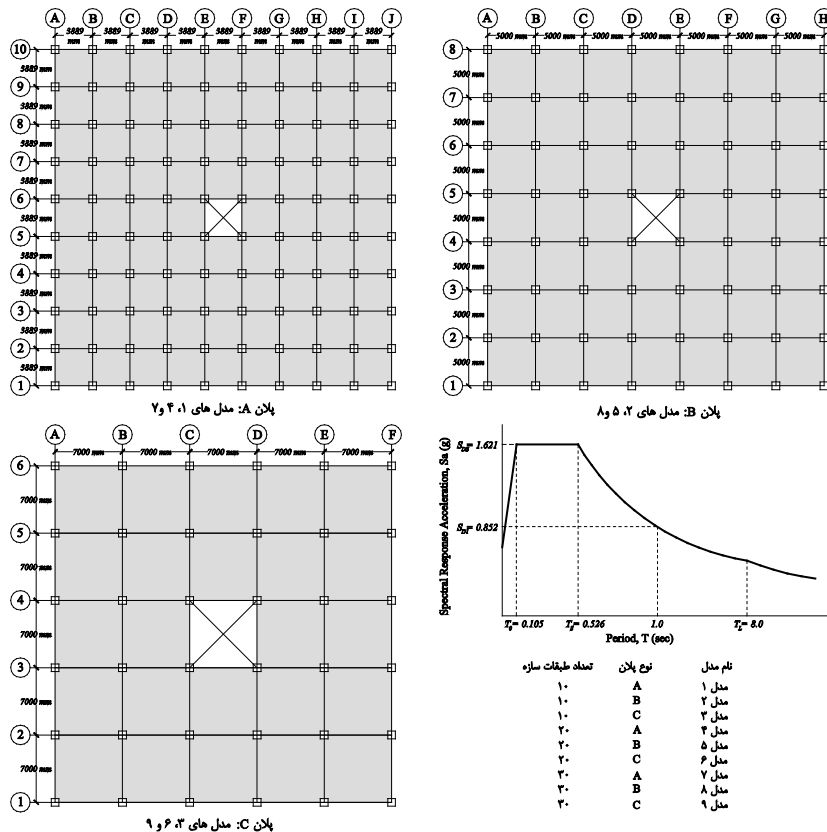
1 Fintel
2 Khan

۱ تا ۳ به روش استاتیکی معادل و سایر سازه‌ها مدل‌های ۴ تا ۹ به روش آنالیز مودال انجام گرفته است. آرتمور مورد استفاده برای اعضای سازه مطابق ضوابط لرزه‌ای ویژه ACI318-14 از میلگرد نوع ASTM A706 Gr60 انتخاب شده است. مقاومت مشخصه بتن ۲۵ مگاپاسکال و ارتفاع طبقات سازه ۳/۵ متر در نظر گرفته شده است. سیستم سقف کلیه سازه‌ها، دال بتنی دو طرفه ۱۸۰ میلیمتری بوده که با توجه به وزن حجمی ۲۳/۵۶۳۲ کیلو نیوتن بر متر مکعبی بتن، دارای بار مرده ۴/۲۴۱ کیلو نیوتن بر متر مربع برای کلیه طبقات می‌باشد. بار کفسازی برای بام و طبقات سازه به ترتیب ۱/۴۹۶ و ۱/۱۵۲ کیلو نیوتن بر متر مربع و بار معادل پارتیشن‌های داخلی برابر ۰/۹۸۰۶۷ کیلو نیوتن بر متر مربع فرض شده است. کاربری سازه‌ها مسکونی بوده و در لوس آنجلس واقع شده‌اند. پارامترهای شتاب طیفی طرح در شکل ۲ و سایر پارامترهای لرزه‌ای مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است [۲۴]. قطر خاموت مورد استفاده در المان‌های عمودی، ۱۰ میلیمتر و با تعداد ساق‌ها و فواصل متناسب با ابعاد ستون، به جهت محصورکنندگی مؤثر ستون در هر مقطع انتخاب شده است. مقاطع اعضا حاصل از طراحی دقیق و بهینه سازه‌ها برای مدل‌های شماره ۱ تا ۳، مدل‌های شماره ۴ تا ۶ و مدل‌های شماره ۷ تا ۹، به ترتیب در جداول ۲، ۳ و ۴ مندرج است.

مختلف بر روی سازه‌های قابی خمشی بتنی با شکل‌پذیری ویژه انجام شده است. بارگذاری کلیه مدل‌های مورد بررسی مطابق ضوابط ASCE7-10 [۲۴] و طراحی تیب آنها با مقاطع یکسان برای هر طبقه خاص به بهینه‌ترین شکل ممکن بر اساس ضوابط ACI318-14 و نتایج حاصل از آنالیز متداول یک مرحله‌ای (بدون در نظر گرفتن پارامترهای وابسته به زمان بتن) صورت گرفته است. پس از طراحی سازه‌ها به روش متداول مذکور، با انجام آنالیزهای غیر خطی مرحله‌ای، نسبت به استخراج روابط ساده حاکم بر کوتاه‌شدگی ستون‌ها تحت ضوابط CEB-FIP90 اقدام شده است. روابط نهائی پیشنهادی تحقیق حاضر تنها برای سازه‌هایی معتبر خواهد بود که اولاً مشخصات هندسی آنها (پلان و ارتفاع) در محدوده عنوان شده تحقیق حاضر که در ادامه معرفی می‌گردد بوده و دوماً طراحی آنها بر اساس آنالیزهای یک مرحله‌ای و مرسوم آئین نامه‌های مذکور و به شکل بهینه باشد.

۲-۱- مشخصات مورد استفاده در طراحی سازه‌ها

جهت بررسی اثر طول دهانه و تعداد طبقات سازه در کوتاه‌شدگی ستون، تعداد ۹ سازه قابی با ۳ نوع پلان مجزا با مشخصات هندسی شکل ۲ و از هر یک از سه نوع پلان مذکور در سه حالت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ طبقه، با نامگذاری مندرج در شکل ۲ مد نظر است. آنالیز کلیه سازه‌های ۱۰ طبقه مدل‌های



شکل ۲: مشخصات طراحی و هندسه پلان‌های مدل‌های مورد بررسی

Fig. 2. Design and geometry specifications of plans of evaluated models

جدول ۱: مشخصات لرزه‌ای مورد استفاده در طراحی سازه‌ها

Table 1. Seismic specifications used in the structural design

مقدار	پارامترهای طراحی لرزه‌ای
D-E	کلاس خاک - دسته طرح لرزه‌ای
۱	ρ , ضریب نامعینی
۸	R, ضریب رفتار
۳	Ω_0 , ضریب مقاومت افزون
۵/۵	C_d , ضریب تشدید تغییر مکان نسبی
II-1	دسته ریسک Ie-, ضریب اهمیت لرزه‌ای

جدول ۲: مشخصات مقاطع اعضا در مدل‌های ۱، ۲ و ۳

Table 2. Cross sectional specifications of members in models 1, 2, and 3

مدل ۳		مدل ۲		مدل ۱		طبقه
ابعاد ستون	ابعاد تیر	ابعاد ستون	ابعاد تیر	ابعاد ستون	ابعاد تیر	
(mm)	(mm)*	(mm)	(mm)*	(mm)	(mm)*	
۵۵۰×۵۵۰ 16T22	۴۰۰×۴۵۰	۴۰۰×۴۰۰ 16T20	۳۰۰×۳۰۰	۳۰۰×۳۰۰ 16T16	۳۰۰×۳۰۰	۱۰
۵۵۰×۵۵۰ 16T22	۵۰۰×۴۵۰	۴۵۰×۴۵۰ 16T25	۴۵۰×۴۰۰	۴۰۰×۴۰۰ 16T16	۳۵۰×۳۵۰	۹
۵۵۰×۵۵۰ 16T25	۶۵۰×۵۰۰	۵۰۰×۵۰۰ 16T22	۴۵۰×۴۵۰	۴۵۰×۴۵۰ 16T16	۴۰۰×۴۰۰	۸
۶۰۰×۶۰۰ 16T25	۶۵۰×۶۵۰	۵۰۰×۵۰۰ 16T22	۵۰۰×۵۰۰	۴۵۰×۴۵۰ 16T16	۴۰۰×۴۰۰	۷
۶۵۰×۶۵۰ 16T28	۶۵۰×۶۵۰	۵۵۰×۵۵۰ 16T20	۵۵۰×۵۰۰	۴۵۰×۴۵۰ 16T16	۴۵۰×۴۵۰	۶
۶۵۰×۶۵۰ 16T28	۷۰۰×۶۵۰	۵۵۰×۵۵۰ 16T25	۵۵۰×۵۰۰	۴۵۰×۴۵۰ 16T16	۴۵۰×۴۵۰	۵
۷۰۰×۷۰۰ 16T25	۷۰۰×۷۰۰	۶۰۰×۶۰۰ 16T20	۵۵۰×۵۵۰	۴۵۰×۴۵۰ 16T18	۵۰۰×۴۵۰	۴
۷۰۰×۷۰۰ 16T28	۷۰۰×۷۰۰	۶۰۰×۶۰۰ 16T20	۵۵۰×۵۵۰	۴۵۰×۴۵۰ 16T20	۵۰۰×۴۵۰	۳
۷۰۰×۷۰۰ 16T28	۷۰۰×۷۰۰	۶۰۰×۶۰۰ 16T20	۵۵۰×۵۵۰	۴۵۰×۴۵۰ 16T25	۵۰۰×۴۵۰	۲
۷۵۰×۷۵۰ 16T32	۷۰۰×۷۰۰	۶۰۰×۶۰۰ 16T20	۵۵۰×۵۵۰	۴۵۰×۴۵۰ 16T25	۵۰۰×۴۵۰	۱

توضیح *: ارائه ابعاد تیرها به شکل $b \times h$ بوده که در آن b عرض تیر و h عمق تیر است

جدول ۳: مشخصات مقاطع اعضا در مدل‌های ۴، ۵ و ۶

Table 3. Cross sectional specifications of members in models 4, 5, and 6

مدل ۶		مدل ۵		مدل ۴		طبقه
ابعاد ستون (mm)	ابعاد تیر (mm)*	ابعاد ستون (mm)	ابعاد تیر (mm)*	ابعاد ستون (mm)	ابعاد تیر (mm)*	
۵۰۰×۵۰۰ 16T25	۴۵۰×۴۰۰	۴۰۰×۴۰۰ 16T20	۳۵۰×۳۵۰	۳۰۰×۳۰۰ 16T18	۳۵۰×۳۰۰	۲۰
۵۵۰×۵۵۰ 16T25	۵۰۰×۴۵۰	۴۵۰×۴۵۰ 16T25	۴۰۰×۴۰۰	۴۰۰×۴۰۰ 16T18	۳۵۰×۳۵۰	۱۹
۶۰۰×۶۰۰ 16T20	۶۰۰×۵۵۰	۵۰۰×۵۰۰ 16T20	۴۵۰×۴۵۰	۵۰۰×۵۰۰ 16T16	۳۵۰×۴۰۰	۱۸
۶۰۰×۶۰۰ 16T25	۶۰۰×۵۵۰	۵۵۰×۵۵۰ 16T20	۴۵۰×۴۵۰	۵۰۰×۵۰۰ 16T16	۳۵۰×۴۵۰	۱۷
۶۵۰×۶۵۰ 16T28	۶۵۰×۶۵۰	۵۵۰×۵۵۰ 16T20	۵۰۰×۵۰۰	۵۰۰×۵۰۰ 16T16	۴۰۰×۴۵۰	۱۶
۷۰۰×۷۰۰ 16T25	۶۵۰×۶۵۰	۶۰۰×۶۰۰ 16T20	۵۰۰×۵۵۰	۵۰۰×۵۰۰ 16T20	۴۰۰×۴۵۰	۱۵
۷۰۰×۷۰۰ 16T25	۶۵۰×۷۰۰	۶۰۰×۶۰۰ 16T20	۵۰۰×۵۵۰	۵۰۰×۵۰۰ 16T22	۴۵۰×۴۵۰	۱۴
۷۰۰×۷۰۰ 16T28	۷۰۰×۷۰۰	۶۰۰×۶۰۰ 16T20	۵۵۰×۵۵۰	۵۵۰×۵۵۰ 16T20	۴۵۰×۵۰۰	۱۳
۷۰۰×۷۰۰ 20T32	۷۰۰×۷۵۰	۶۵۰×۶۵۰ 16T25	۵۵۰×۶۰۰	۵۵۰×۵۵۰ 16T20	۴۵۰×۵۰۰	۱۲
۷۵۰×۷۵۰ 16T28	۷۵۰×۷۵۰	۶۵۰×۶۵۰ 16T25	۵۵۰×۶۰۰	۵۵۰×۵۵۰ 16T20	۴۵۰×۵۰۰	۱۱
۷۵۰×۷۵۰ 24T32	۷۵۰×۷۵۰	۶۵۰×۶۵۰ 16T25	۵۵۰×۶۰۰	۵۵۰×۵۵۰ 16T20	۵۰۰×۵۰۰	۱۰
۸۰۰×۸۰۰ 20T32	۷۵۰×۷۵۰	۶۵۰×۶۵۰ 16T25	۶۰۰×۶۰۰	۵۵۰×۵۵۰ 16T20	۵۰۰×۵۰۰	۹
۸۰۰×۸۰۰ 24T32	۷۵۰×۸۰۰	۶۵۰×۶۵۰ 16T25	۶۰۰×۶۰۰	۵۵۰×۵۵۰ 16T20	۵۰۰×۵۰۰	۸
۸۵۰×۸۵۰ 24T32	۷۵۰×۸۰۰	۶۵۰×۶۵۰ 16T28	۶۰۰×۶۵۰	۶۰۰×۶۰۰ 16T20	۵۰۰×۵۵۰	۷
۸۵۰×۸۵۰ 28T32	۷۵۰×۸۵۰	۷۰۰×۷۰۰ 16T25	۶۰۰×۶۵۰	۶۰۰×۶۰۰ 16T20	۵۰۰×۵۵۰	۶
۹۰۰×۹۰۰ 32T28	۷۵۰×۹۰۰	۷۰۰×۷۰۰ 16T28	۶۰۰×۷۰۰	۶۰۰×۶۰۰ 16T20	۵۰۰×۶۰۰	۵
۹۵۰×۹۵۰ 32T28	۷۵۰×۹۰۰	۷۰۰×۷۰۰ 20T32	۶۰۰×۷۰۰	۶۵۰×۶۵۰ 16T25	۵۰۰×۶۰۰	۴
۹۵۰×۹۵۰ 32T32	۷۵۰×۹۰۰	۷۵۰×۷۵۰ 16T28	۶۰۰×۷۵۰	۶۵۰×۶۵۰ 16T25	۵۰۰×۶۰۰	۳
۱۰۰۰×۱۰۰۰ 32T32	۷۵۰×۹۵۰	۷۵۰×۷۵۰ 16T32	۶۰۰×۷۵۰	۶۵۰×۶۵۰ 16T25	۵۰۰×۶۰۰	۲
۱۰۵۰×۱۰۵۰ 32T32	۷۵۰×۹۵۰	۷۵۰×۷۵۰ 24T32	۶۰۰×۷۵۰	۶۵۰×۶۵۰ 16T32	۵۰۰×۶۰۰	۱

توضیح *: ارائه ابعاد تیرها به شکل $b \times h$ بوده که در آن b عرض تیر و h عمق تیر است

جدول ۴: مشخصات مقاطع اعضا در مدل‌های ۷، ۸ و ۹

Table 4. Cross sectional specifications of members in models 7, 8, and 9

مدل ۹		مدل ۸		مدل ۷		طبقه
ابعاد ستون (mm)	ابعاد تیر (mm)*	ابعاد ستون (mm)	ابعاد تیر (mm)*	ابعاد ستون (mm)	ابعاد تیر (mm)*	
۵۰۰×۵۰۰ 16T28	۴۵۰×۵۰۰	۴۰۰×۴۰۰ 16T22	۴۵۰×۳۵۰	۳۵۰×۳۵۰ 16T16	۳۰۰×۳۵۰	۳۰
۵۵۰×۵۵۰ 16T25	۶۰۰×۵۰۰	۴۵۰×۴۵۰ 16T25	۴۵۰×۳۵۰	۴۵۰×۴۵۰ 16T16	۳۰۰×۳۵۰	۲۹
۶۵۰×۶۵۰ 16T25	۶۰۰×۵۵۰	۵۵۰×۵۵۰ 16T20	۵۰۰×۴۵۰	۵۰۰×۵۰۰ 16T20	۴۰۰×۴۰۰	۲۸
۷۰۰×۷۰۰ 16T25	۶۵۰×۶۰۰	۵۵۰×۵۵۰ 16T22	۵۰۰×۴۵۰	۵۰۰×۵۰۰ 16T28	۴۰۰×۴۰۰	۲۷
۷۰۰×۷۰۰ 16T28	۷۰۰×۶۵۰	۶۰۰×۶۰۰ 16T22	۵۵۰×۴۵۰	۵۵۰×۵۵۰ 16T20	۴۵۰×۴۵۰	۲۶
۷۰۰×۷۰۰ 20T32	۷۰۰×۶۵۰	۶۰۰×۶۰۰ 16T22	۶۰۰×۴۵۰	۵۵۰×۵۵۰ 16T20	۴۵۰×۵۰۰	۲۵
۷۵۰×۷۵۰ 16T28	۷۵۰×۷۰۰	۶۰۰×۶۰۰ 16T25	۶۰۰×۴۵۰	۶۰۰×۶۰۰ 16T20	۴۵۰×۵۰۰	۲۴
۷۵۰×۷۵۰ 24T32	۷۵۰×۷۰۰	۶۰۰×۶۰۰ 16T28	۶۵۰×۴۵۰	۶۰۰×۶۰۰ 16T20	۴۵۰×۵۰۰	۲۳
۸۰۰×۸۰۰ 20T28	۸۰۰×۷۰۰	۶۵۰×۶۵۰ 16T25	۶۵۰×۵۰۰	۶۰۰×۶۰۰ 16T20	۵۰۰×۵۰۰	۲۲
۸۰۰×۸۰۰ 20T32	۸۰۰×۷۰۰	۶۵۰×۶۵۰ 16T25	۶۵۰×۵۰۰	۶۰۰×۶۰۰ 16T20	۵۰۰×۵۰۰	۲۱
۸۰۰×۸۰۰ 24T32	۸۵۰×۷۰۰	۶۵۰×۶۵۰ 16T25	۶۵۰×۵۵۰	۶۰۰×۶۰۰ 16T25	۵۵۰×۵۰۰	۲۰
۸۰۰×۸۰۰ 28T32	۸۵۰×۷۰۰	۷۰۰×۷۰۰ 16T25	۶۵۰×۵۵۰	۶۰۰×۶۰۰ 16T25	۵۵۰×۵۰۰	۱۹
۸۵۰×۸۵۰ 28T32	۸۵۰×۷۰۰	۷۰۰×۷۰۰ 16T25	۶۵۰×۵۵۰	۶۰۰×۶۰۰ 16T25	۵۵۰×۵۰۰	۱۸
۹۰۰×۹۰۰ 32T28	۸۵۰×۷۵۰	۷۰۰×۷۰۰ 16T28	۷۰۰×۵۵۰	۶۵۰×۶۵۰ 16T25	۵۵۰×۵۰۰	۱۷
۹۰۰×۹۰۰ 32T32	۸۵۰×۷۵۰	۷۰۰×۷۰۰ 20T32	۷۰۰×۵۵۰	۶۵۰×۶۵۰ 16T25	۵۵۰×۵۵۰	۱۶
۹۵۰×۹۵۰ 32T32	۸۵۰×۸۰۰	۷۰۰×۷۰۰ 20T32	۷۰۰×۶۰۰	۶۵۰×۶۵۰ 16T25	۵۵۰×۵۵۰	۱۵
۹۵۰×۹۵۰ 32T32	۸۵۰×۸۵۰	۷۵۰×۷۵۰ 16T32	۷۰۰×۶۰۰	۶۵۰×۶۵۰ 16T25	۵۵۰×۶۰۰	۱۴
۱۰۰۰×۱۰۰۰ 32T32	۸۵۰×۸۵۰	۷۵۰×۷۵۰ 24T32	۷۰۰×۶۰۰	۷۰۰×۷۰۰ 16T25	۵۵۰×۶۰۰	۱۳
۱۰۰۰×۱۰۰۰ 36T32	۸۵۰×۹۰۰	۸۰۰×۸۰۰ 20T28	۷۰۰×۶۰۰	۷۰۰×۷۰۰ 16T25	۵۵۰×۶۰۰	۱۲
۱۰۵۰×۱۰۵۰ 36T32	۸۵۰×۹۰۰	۸۰۰×۸۰۰ 20T32	۷۰۰×۶۰۰	۷۰۰×۷۰۰ 16T25	۵۵۰×۶۵۰	۱۱
۱۰۵۰×۱۰۵۰ 36T32	۸۵۰×۹۰۰	۸۰۰×۸۰۰ 24T32	۷۰۰×۶۰۰	۷۰۰×۷۰۰ 16T25	۵۵۰×۶۵۰	۱۰
۱۱۰۰×۱۱۰۰ 44T32	۸۵۰×۹۰۰	۸۰۰×۸۰۰ 28T32	۷۰۰×۶۵۰	۷۰۰×۷۰۰ 16T28	۵۵۰×۶۵۰	۹
۱۱۵۰×۱۱۵۰ 44T32	۸۵۰×۹۵۰	۸۵۰×۸۵۰ 28T32	۷۰۰×۶۵۰	۷۰۰×۷۰۰ 20T32	۵۵۰×۶۵۰	۸
۱۲۰۰×۱۲۰۰ 48T32	۸۵۰×۹۵۰	۹۰۰×۹۰۰ 32T28	۷۰۰×۶۵۰	۷۰۰×۷۰۰ 20T32	۶۰۰×۶۵۰	۷
۱۲۰۰×۱۲۰۰ 52T32	۸۵۰×۹۵۰	۹۰۰×۹۰۰ 32T32	۷۰۰×۷۰۰	۷۰۰×۷۰۰ 20T32	۶۰۰×۶۵۰	۶
۱۲۵۰×۱۲۵۰ 48T32	۸۵۰×۱۰۰۰	۹۵۰×۹۵۰ 32T32	۷۰۰×۷۵۰	۷۵۰×۷۵۰ 24T32	۶۰۰×۶۵۰	۵
۱۲۵۰×۱۲۵۰ 56T32	۸۵۰×۱۰۰۰	۹۵۰×۹۵۰ 32T32	۷۰۰×۷۵۰	۷۵۰×۷۵۰ 24T32	۶۰۰×۶۵۰	۴
۱۳۰۰×۱۳۰۰ 56T32	۸۵۰×۱۰۰۰	۱۰۰۰×۱۰۰۰ 32T32	۷۰۰×۷۵۰	۷۵۰×۷۵۰ 24T32	۶۰۰×۶۵۰	۳
۱۳۰۰×۱۳۰۰ 64T32	۸۵۰×۱۰۰۰	۱۰۰۰×۱۰۰۰ 36T32	۷۰۰×۷۵۰	۸۰۰×۸۰۰ 24T32	۶۰۰×۶۵۰	۲
۱۳۵۰×۱۳۵۰ 68T32	۸۵۰×۱۰۵۰	۱۰۵۰×۱۰۵۰ 40T32	۷۰۰×۸۰۰	۸۰۰×۸۰۰ 28T32	۶۰۰×۶۵۰	۱

توضیح *: ارائه ابعاد تیرها به شکل $b \times h$ بوده که در آن b عرض تیر و h عمق تیر است

۲-۲- مشخصات مورد استفاده در آنالیز غیر خطی مرحله‌ای سازه‌های طرح شده

مهمترین مشخصه مورد استفاده در بخش آنالیز مرحله‌ای سازه‌های طرح شده به روش مرسوم، تعیین مراحل ساخت و دوره زمانی ساخت مشخص برای هر طبقه و سنین بارگذاری طبقات است. در این پروژه، سن بارگذاری کلیه طبقات (t_0) یعنی مدت زمان نصب قالب‌ها و بتن‌ریزی تا لحظه باز کردن قالب‌ها که از آن به شروع بارگذاری عضو تعبیر می‌شود، به جهت سادگی برابر با مدت زمان ساخت ۷ روزه طبقه در نظر گرفته می‌شود. شروع آبرفتگی اعضا (t_g) برابر ۳ روز و درصد رطوبت محیط برابر ۵۰ درصد [۲۵] انتخاب شده است. مشخصات مقاومتی مصالح مورد استفاده برابر فرضیات اولیه مطرح شده در بخش صحت‌سنجی مدل‌سازی فرض شده است. لازم به ذکر است که بعد نظری برای هر عضو سازه‌ای، به شکل اتوماتیک توسط نرم‌افزار در مرحله آنالیزهای غیرخطی مرحله‌ای محاسبه می‌شود. همانطور که قبلاً نیز اشاره شد کمیت مذکور در روابط نهائی پیشنهادی تحقیق حاضر منعکس نشده است. استقلال روابط پیشنهادی روش مقاله حاضر از نسبت حجم به سطح جانبی، با توجه به اعمال قید اولیه‌ی لحاظ مقاطع بهینه در مرحله طراحی، مزیت روش تحقیق حاضر به شمار می‌رود. ترکیب بار ثقلی مورد استفاده در بحث توالی ساخت به شکل رابطه ۷ می‌باشد.

$$D_L + 0.2L_L \quad (7)$$

که در آن D_L بار مرده فقط ناشی از وزن اسکلت سازه شامل تیر، ستون و دال‌ها بوده و L_L بار زنده در نظر گرفته شده برای سازه‌های مسکونی مطابق ضوابط ASCE7-10 می‌باشد. در نظر گرفتن درصدی از بار زنده در محاسبات غیرخطی مرحله‌ای سازه‌ها، به آن دلیل است که اثرات احتمالی ناشی از عملیات بهره‌برداری برخی از طبقات سازه، مانند کفسازی یا پارتیشن‌بندی که ممکن است قبل از اتمام نهائی تمامی طبقات

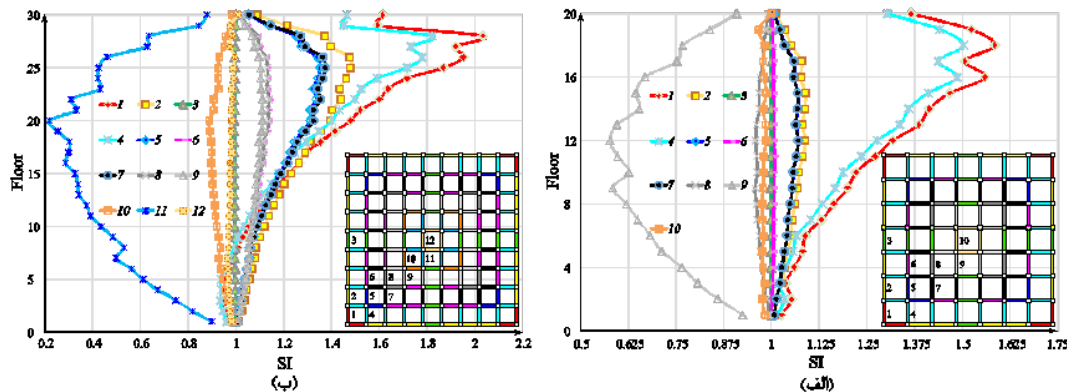
رخ دهد، در آنالیز اعمال گردد. پس از انجام آنالیزهای غیر خطی مرحله‌ای و حصول مقادیر کوتاه‌شدگی ناشی از خزش، آبرفتگی و تغییرات زمانی مدول الاستیسیته برای تمامی ستون‌های ۹ سازه مورد بررسی در روز ۱۰۰۰ ام از ساخت، آنالیز حساسیت لنگر خمشی تیرها به توالی ساخت انجام شده است. آنالیز مذکور به جهت مشخص نمودن ستون‌های تعریف‌کننده حساس‌ترین تیرها به رفتار دراز مدت غیر خطی مرحله‌ای المان‌های عمودی و نهایتاً دسته‌بندی ستون‌ها با رفتار یکسان انجام شده است.

۲-۳- آنالیز حساسیت

میزان حساسیت لنگر منفی ابتدای دهانه تیرهای کلیه سازه‌ها به توالی ساخت با استفاده از ضریب بی بعد SI سنجیده شده است. ضریب مذکور مطابق رابطه ۸ از تقسیم لنگر خمشی منفی ابتدای دهانه هر تیر ناشی از آنالیز غیرخطی مرحله‌ای فاقد اثرات دراز مدت بتن (M_{NSA}^-) بر مقدار متناظر ناشی از آنالیز متداول یک مرحله‌ای سازه بدون اثرات دراز مدت بتن (M_{CA}^-) حاصل می‌شود. ترکیب بار مورد استفاده در محاسبه هر یک از دو لنگر مذکور تحت آنالیزهای مربوطه به صورت رابطه ۷ می‌باشد.

$$SI = M_{NSA}^- / M_{CA}^- \quad (8)$$

نزدیک بودن ضریب فوق به عدد یک به معنای عدم حساسیت عضو مورد بررسی به توالی ساخت و انحراف بزرگتر ضریب از عدد یک به معنای حساسیت بیشتر عضو است. آنالیز حساسیت کلیه مدل‌ها نتایج مشابهی در پی داشته است. نتایج مذکور به عنوان مثال برای مدل‌های شماره ۵ و ۷ به ترتیب در شکل ۳-الف و ب نشان داده شده است. در شکل فوق، تیرهای هر سازه که با در نظر گرفتن تقارن بارگذاری و هندسی سازه، حساسیت یکسانی به توالی ساخت داشته‌اند با رنگ‌های یکسان دسته‌بندی شده‌اند.



شکل ۳: آنالیز حساسیت تیرهای مدل (الف) شماره ۵ (ب) شماره ۷

Fig. 3. Sensitivity analysis of beams in model a) number 5 and b) number 7

محدوده‌ای از مقادیر مختلف μ با کران‌های بالا و پایین متفاوتی را در سازه‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ طبقه شامل می‌شود. از آنجا که هدف تحقیق حاضر ارائه روابطی برای کوتاه‌شدگی ستون‌های کلیه سازه‌های قابی شکل‌پذیر تا ۳۰ طبقه است، لذا با رسم کران‌های بالا و پائین برای هر یک از سه دسته منحصر بفرد مذکور و برازش بهترین منحنی گذرنده از مقادیر مربوط به سازه‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ طبقه، روابطی بازه‌ای بر حسب تعداد طبقات سازه جهت تخصیص هر ستون دلخواه به هر یک از سه دسته ستون تعریف شده، مطابق شکل ۴ حاصل می‌شود.

مطابق شکل ۴، با توجه به برازش‌های انجام شده برای در بر گرفتن کلیه سازه‌های قابی تا ۳۰ طبقه، روابط ۱۱، ۱۲ و ۱۳ به ترتیب برای ستون تیپ ۱، ستون تیپ ۲ و ستون تیپ ۳ ارائه می‌گردد.

$$0.0233(n)^{0.636} \leq \mu \leq 0.0687(n)^{0.364} \Rightarrow C1 \quad (11)$$

$$0.0687(n)^{0.364} < \mu \leq 0.17(n)^{0.171} \Rightarrow C2 \quad (12)$$

$$0.17(n)^{0.171} < \mu \leq 0.339(n)^{0.0572} \Rightarrow C3 \quad (13)$$

که در آن (n) تعداد طبقات سازه می‌باشد. با محاسبه مقدار μ برای هر ستون دلخواه از طبقه اول هر سازه بتنی با سیستم قاب خمشی شکل‌پذیر که به شکل بهینه و به روش متداول طراحی شده است و جایگذاری در محدوده‌های روابط ۱۱ تا ۱۳ نوع ستون جهت استفاده از روابط پیشنهادی تحقیق حاضر مشخص می‌گردد. آنالیزهای غیر خطی مرحله‌ای کلیه مدل‌های مورد بررسی برای ستون تیپ C3 نشان داد که با وجود مقادیر یکسان μ ، مقادیر کوتاه‌شدگی کلیه ستون‌های تیپ مذکور یکسان نبوده و خود به دو دسته C3-I (ستون‌های قرار گرفته در قطر پلان سازه) و C3-II (سایر ستون‌های تیپ C3) قابل تقسیم است. بنابراین نهایتاً ۴ دسته ستون مورد بررسی مطابق شکل ۵ جهت اختصاص روابط کوتاه‌شدگی‌های دراز مدت، مورد بررسی خواهند بود.

همانطور که مشاهده می‌شود، حساس‌ترین تیرها در مدل شماره ۵، به ترتیب تیرهای با شماره کد ۱، ۴ و ۹ در پلان و راهنمای شکل مربوطه (کد رنگ قرمز، فیروزه‌ای و خاکستری) و در مدل شماره ۷، به ترتیب تیرهای با شماره کد ۱، ۴ و ۱۱ در پلان و راهنمای شکل مربوطه (کد رنگ قرمز، فیروزه‌ای و آبی) می‌باشند. دقت مضاعف در تیرهای حساس مطروحه، روشن می‌سازد که تمامی تیرهای یاد شده، واسط بین ستون‌هایی با سهم بارگیر متفاوت می‌باشند. از این رو انتخاب معیاری به منظور دسته‌بندی مشخص ستون‌ها در پلان و اختصاص روابط پیشنهادی کوتاه‌شدگی به دسته‌های مربوطه، امری بدیهی است که در ادامه بدان پرداخته می‌شود.

۲-۴- تیپ بندی ستون‌ها جهت اختصاص روابط پیشنهادی

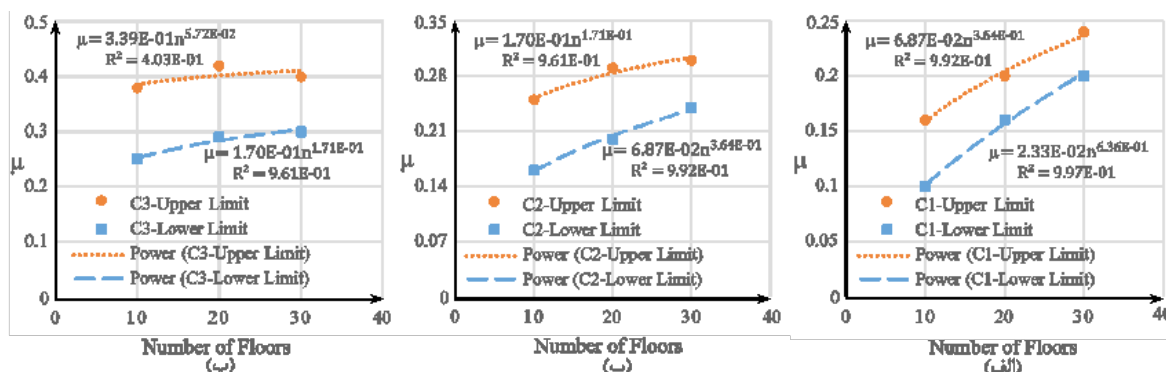
به منظور انتخاب معیار مناسب که قادر به تفکیک ستون‌ها با سهم بارگیر متفاوت در پلان سازه باشد، از نسبت بار محوری موجود به ظرفیت نهائی محوری در طبقه اول هر سازه مطابق رابطه ۹ استفاده می‌شود.

$$\mu = P_u^1 / P_r^1 \quad (9)$$

که در رابطه فوق (P_u^1) بار محوری موجود حاصل از ترکیب بار رابطه ۷ در ستون طبقه اول سازه ناشی از آنالیز متداول یک مرحله ای و (P_r^1) ظرفیت محوری همان ستون مطابق رابطه ۱۰ است.

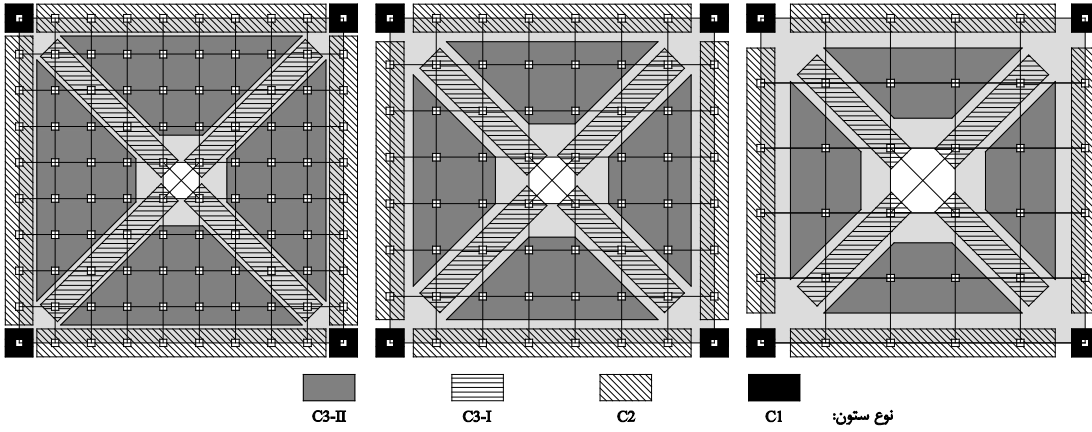
$$P_r^1 = 0.8\phi[0.85f'_c(A_{gt} - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (10)$$

که در آن (A_{gt}) سطح مقطع کلی ستون، (A_{st}) سطح مقطع آرماتورهای طولی، (f_y) مقاومت تسلیم آرماتورهای طولی و (ϕ) ضریب کاهش مقاومت بر اساس ضوابط 14-ACI318 می‌باشد که برای سازه‌های تحقیق حاضر مقدار ۰/۶۵ خواهد داشت. مشاهده مقادیر μ محاسبه شده برای تمامی ستون‌های طبقه اول کلیه ۹ مدل مورد بررسی، حاکی از امکان طبقه‌بندی ستون‌ها در سه دسته مشخص است. هر یک از سه دسته طبقه‌بندی مذکور،



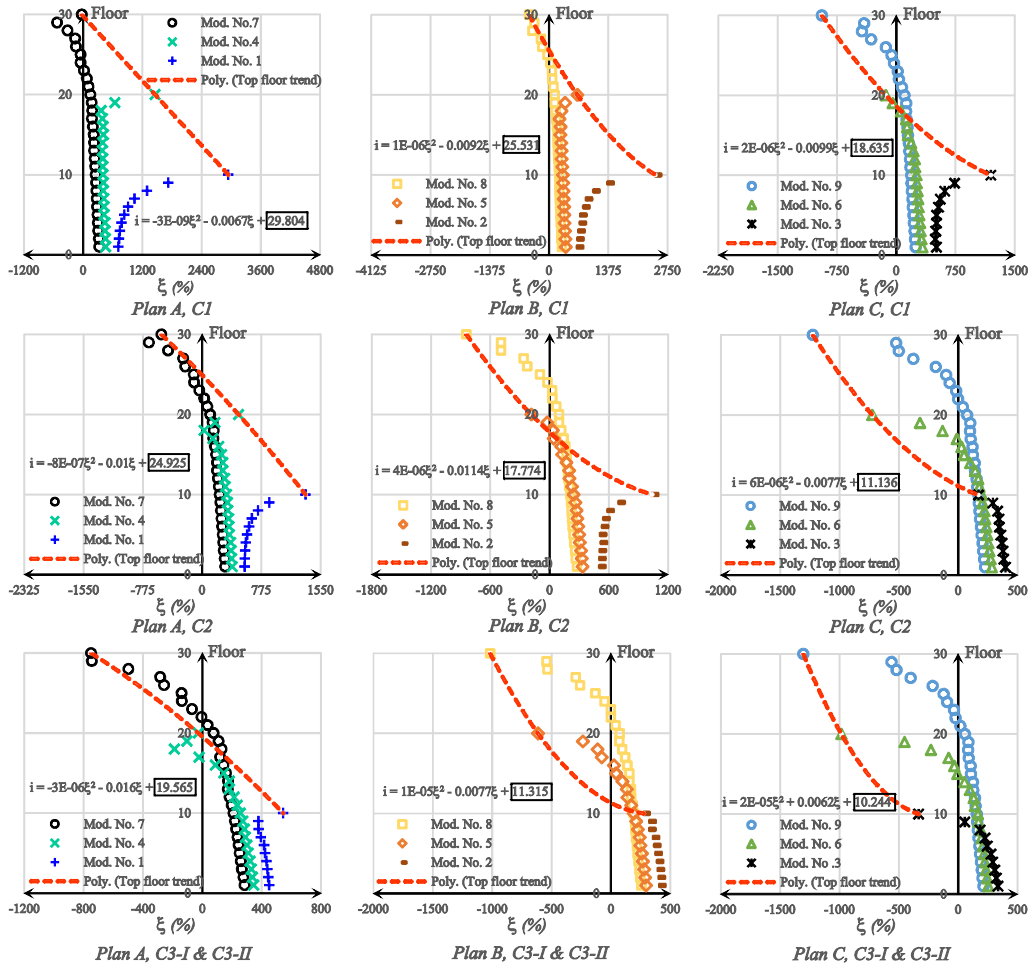
شکل ۴: تعیین محدوده استفاده از روابط پیشنهادی کوتاه‌شدگی برای الف) ستون تیپ ۱ ب) ستون تیپ ۲ پ) ستون تیپ ۳

Fig. 4. Determination of the using range of proposed equations of shortening for a) column type 1 b) column type 2 and c) column type 3



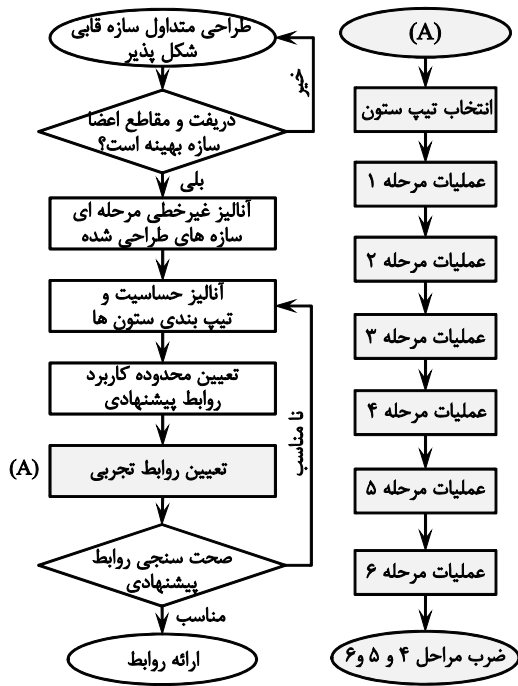
شکل ۵: تیپ بندی نهائی ستون‌ها در پلان

Fig. 5. Ultimate classification of columns in the plan



شکل ۶: مقادیر ζ در طبقات مختلف مدل‌های مورد بررسی برای ستون‌های تیپ ۱، ۲ و ۳

Fig. 6. Values of ζ in different floors of evaluated trend models for column type C1, C2, and C3



شکل ۷: الگوریتم اعمال استخراج روابط ساده پیشنهادی تحقیق حاضر

Fig. 7. Algorithm of extracting the proposed equations of the present research

عملیات مراحل ۱ تا ۶ در شکل ۷ به شرح زیر است؛
 عملیات مرحله ۱: در این مرحله میانگین گیری بین مقادیر کوتاه شدگی خزشی (آبرفتگی، الاستیک) کلیه ستون های موجود در تیپ ستون انتخابی انجام شده و در هر یک از ۹ مدل مورد بررسی تنها یک سری داده کوتاه شدگی برای تیپ ستون مورد نظر تشکیل می گردد.
 عملیات مرحله ۲: در این مرحله بین نتایج حاصل از مرحله ۱ در سه پلان A، B و C سازه های ۱۰ طبقه میانگین گیری شده و با تکرار این عمل برای سازه های ۲۰ و ۳۰ طبقه، تعداد ۹ سری داده کوتاه شدگی مرحله اول، به ۳ سری داده خلاصه می گردد. با انجام این مرحله، اثر طول دهانه موقتاً نادیده گرفته می شود.
 عملیات مرحله ۳: در این مرحله با ترسیم مقادیر کوتاه شدگی حاصله از مرحله ۲ برای هر یک از حالات ۱۰، ۲۰ و ۳۰ طبقه و برازش بهترین منحنی گذرنده از هر یک، معادلات حاکم بر آنها تعیین می گردد.
 عملیات مرحله ۴: در این مرحله با انجام سعی و خطا جهت یافتن بهترین برازش ممکن، معادله کلی حاکم بر ۳ معادله حاصل از مرحله ۳، تعیین می شود. با این عمل ضرایب ثابت معادلات مرحله ۳، به توابعی از تعداد طبقات سازه در معادله نهائی تبدیل می گردند. معادله نهائی حاکم که تنها تابعی از شماره طبقه و تعداد طبقات سازه است، به عنوان فاکتور اثر تعداد طبقه سازه در تخمین کوتاه شدگی خزشی (آبرفتگی، الاستیک) در پایان این مرحله ذخیره می شود.

۲-۵- حساسیت طبقاتی سازه های مورد بررسی به کرنش های غیر الاستیک دراز مدت

جهت آگاهی از میزان حساسیت کوتاه شدگی دراز مدت انواع تیپ ستون تعریف شده به تعداد طبقات سازه، از نتایج حاصل از آنالیزهای دقیق غیر خطی مرحله ای مدل ها، استفاده شده است. به عبارت دیگر هدف آن است که درصد تغییرات کوتاه شدگی دراز مدت و مرحله ای انواع ستون ها نسبت به مقادیر متناظر فاقد اثرات دراز مدت و حاصل از آنالیزهای متداول یک مرحله ای، با افزایش تعداد طبقات سازه سنجیده شود. بدین منظور پارامتر ξ در قالب درصد تغییرات کرنش محوری مرحله ای (شامل اثرات دراز مدت بتن) هر ستون خاص (ϵ_{NSA}) نسبت به کرنش محوری متداول (فاقد اثرات دراز مدت بتن) همان ستون (ϵ_{CA}) مطابق رابطه ۱۴ تعریف می شود.

$$\xi = [(\epsilon_{NSA} - \epsilon_{CA}) / \epsilon_{CA}] \times 100 \quad (14)$$

نتایج حاصل از محاسبه ξ برای ستون های تیپ C1، C2 و C3 کلیه مدل های مورد بررسی در انواع پلان های مدنظر تحقیق حاضر، در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، در هر یک از ۹ قسمت موجود در شکل ۶ نحوه رشد مقادیر ξ با افزایش طبقات سازه، با برازش منحنی گذرنده از مقادیر ξ در آخرین طبقه هر سازه و قید معادله مربوطه نشان داده شده است. مزیت انجام عمل فوق آن است که ضمن مشاهده نحوه رشد بیشترین درصد تغییرات کرنش محوری رخ داده در طبقات هر سازه، امکان یافتن مرزی برای طبقات سازه که با افزایش تعداد طبقات سازه از مقدار مذکور، میزان حساسیت سازه به کوتاه شدگی مرحله ای رشد چشمگیر خواهد داشت، مشخص خواهد شد. تعیین مرز حساسیت طبقاتی با قراردادن مقدار ξ برابر صفر در هر یک از روابط اشکال مربوطه انجام می گیرد. مقادیر مذکور که در هر یک از قسمت های شکل ۶ با کادر مشکی مشخص شده است، نشان دهنده آن است که در هر سازه و بر حسب شرایط، مقادیر متفاوتی از حساسیت طبقاتی وجود دارد؛ لیکن در بیشتر سازه ها می توان با تقریب قابل قبولی از سازه های بیشتر از ۱۰ طبقه به عنوان سازه های حساس به کوتاه شدگی مرحله ای یاد نمود.

۳- تعیین روابط ساده پیش بینی کننده رفتار دراز مدت ستون

۳-۱- الگوریتم استخراج روابط پیشنهادی

جهت حصول روابط ساده پیش بینی کننده رفتار دراز مدت ستون های سازه های قابی شکل پذیر، از الگوریتم شکل ۷ استفاده شده است.

$$\begin{cases} A = 1.9498 \times 10^{-9} n^2 - 8.4736 \times 10^{-8} n + 2.9289 \times 10^{-7} \\ B = -7.2789 \times 10^{-8} n^2 + 4.5947 \times 10^{-6} n - 7.0731 \times 10^{-5} \\ C = -4.2560 \times 10^{-7} n^2 + 2.1812 \times 10^{-5} n + 3.8596 \times 10^{-4} \\ D = 3.8916 \times 10^{-7} n^2 - 1.6506 \times 10^{-5} n + 1.1581 \times 10^{-4} \end{cases} \quad (16)$$

پرو واضح است که با جایگذاری اعداد ۱۰، ۲۰ و ۳۰ بجای n در مجموعه روابط ۱۶، ۳ معادله اولیه شکل ۸ حاصل خواهند شد. با تقسیم مقادیر واقعی کوتاه‌شدگی تیپ ستون انتخابی حاصل از آنالیز غیرخطی مرحله ای (f_{NSA}) بر مقادیر متناظر حاصل از رابطه (Eq. 15) $f_{Eq. 15}$ در هر یک از مدل‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ طبقه پلان نوع A و با روی نمودار بردن مقادیر حاصله ($\chi = f_{NSA} / f_{Eq. 15}$)، روابط اولیه که با ضرب آنها در مقادیر رابطه ۱۵ اثر میانگین‌گیری رخ داده در مرحله ۲ خنثی می‌شود، برای هر یک از مدل‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ طبقه پلان نوع A مطابق شکل ۹-الف حاصل می‌شود. لازم به ذکر است که در صورت انجام عملیات مرحله ۱ و میانگین‌گیری بین مقادیر کوتاه‌شدگی کلیه ستون‌های قرار گرفته در تیپ ستون انتخابی، مقادیر انتخابی برای انجام عملیات مرحله حاضر مرحله ۵ به صورت ($\chi = f_{1st Step} / f_{Eq. 15}$) تعریف می‌گردد. به عنوان مثال چنانچه انجام عملیات مرحله ۵ برای آبرفتگی ستون تیپ C3-II برای سه مدل پلان نوع C مد نظر باشد، مقادیر انتخابی برای انجام عملیات مرحله ۵، از تقسیم مقادیر میانگین حاصل از مرحله ۱ بر مقادیر متناظر به دست آمده از مرحله ۴ ستون مذکور بصورت ($\chi = f_{1st Step} / f_{4th Step}$)، مطابق شکل ۹-ب محاسبه می‌شوند.

معادله کلی حاکم بر سه رابطه شکل ۹-الف با انجام برازش‌های مناسب، مطابق رابطه ۱۷ با ضرایبی از چند جمله‌ای‌های درجه ۲ به صورت رابطه ۱۸ ارائه می‌شود.

$$(CS_{C1})_{Creep} = G \exp(H \times i) \quad (17)$$

$$\begin{cases} G = an^2 + bn + c \\ H = dn^2 + en + f \end{cases} \quad (18)$$

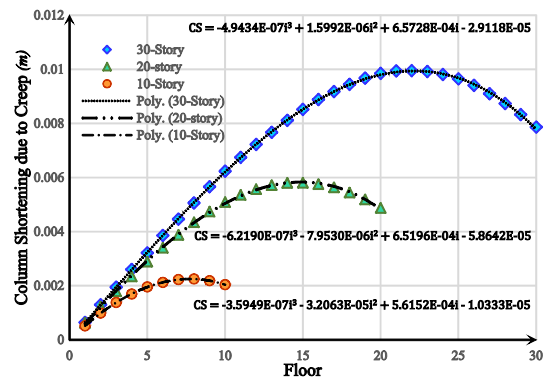
با تکرار پروسه ذکر شده در خصوص پلان نوع A، برای پلان‌های B و C، ضرایب a تا f رابطه ۱۸ بصورت توابع چند جمله‌ای درجه ۲ مطابق مجموعه روابط ۱۹ محاسبه شده و اثر ابعاد متفاوت پلان‌های مذکور در روابط انعکاس می‌یابد (مرحله ۵).

$$\begin{cases} a = 1.2091 \times 10^{-3} l^2 - 1.3812 \times 10^{-2} l + 3.7281 \times 10^{-2} \\ b = -5.0100 \times 10^{-2} l^2 + 5.6659 \times 10^{-1} l - 1.5124 \\ c = 4.7018 \times 10^{-1} l^2 - 5.2694 l + 1.4978 \times 10^{+1} \\ d = -4.6210 \times 10^{-5} l^2 + 5.2724 \times 10^{-4} l - 1.4247 \times 10^{-3} \\ e = 1.8945 \times 10^{-3} l^2 - 2.1760 \times 10^{-2} l + 5.9285 \times 10^{-2} \\ f = -1.7399 \times 10^{-2} l^2 + 2.0726 \times 10^{-1} l - 5.8755 \times 10^{-1} \end{cases} \quad (19)$$

عملیات مرحله ۵: در این مرحله اثر طول دهانه با روند معکوس میانگین‌گیری مرحله ۲، در معادلات پیشنهادی اعمال می‌گردد. برای این منظور مقادیر حاصل از رابطه مرحله ۴ در هر یک از مدل‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ طبقه، با مقادیر میانگین کوتاه‌شدگی حاصل از مرحله ۱، ابتدا در پلان نوع A مقایسه شده و اختلاف عددی موجود در هر طبقه به شکل تابعی از تعداد و شماره طبقات سازه تعیین می‌گردد. با تکرار روند مذکور برای سازه‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ طبقه پلان نوع B و سپس پلان نوع C، ۳ معادله برای هر طول دهانه مشخص می‌گردد. با انجام عملیاتی مشابه مرحله ۴، معادله کلی حاکم بر ۳ معادله مذکور که تابعی از تعداد طبقات سازه، شماره طبقه و طول دهانه می‌باشد، تعیین شده و در پایان این مرحله ذخیره می‌شود.

عملیات مرحله ۶: در این مرحله اثر مستقیم طول ستون (ارتفاع طبقه) در مقادیر کوتاه‌شدگی حاصله، با ضریب ($h_i/3.5$) اعمال می‌گردد. (h_i) ارتفاع طبقه بر حسب متر می‌باشد.

جهت پیاده‌سازی الگوریتم شکل ۷ و شرح عملیات مراحل مختلف آن، کوتاه‌شدگی خزشی ستون تیپ C1 مد نظر است. با توجه به یکسان بودن مقادیر کوتاه‌شدگی خزشی حاصل از آنالیز غیرخطی مرحله‌ای ۴ ستون تیپ C1 در هر یک از ۹ مدل مورد بررسی، از عملیات مرحله اول صرف نظر می‌گردد. نتایج حاصل از میانگین‌گیری بین مقادیر کوتاه‌شدگی پلان‌های A، B و C در هر یک از مدل‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ طبقه مرحله ۲، مطابق شکل ۸ ترسیم و معادلات حاکم بر هر کدام به صورت چند جمله‌ای درجه ۳ انتخاب می‌شود مرحله ۳.



شکل ۸: نتایج حاصل از عملیات مرحله ۳ برای کوتاه‌شدگی ناشی از خزش ستون نوع C1

Fig. 8. The results of 3rd step of operation for creep shortening of C1 column

رابطه کوتاه‌شدگی حاکم بر ۳ معادله شکل ۸ مطابق رابطه ۱۵ با ضرایب مشروحه مطابق رابطه ۱۶ ارائه می‌گردد (مرحله ۴).

$$(CS_{C1})_{Creep} = Ai^3 + Bi^2 + Ci + D \quad (15)$$

$$CS_{Creep}(i, h_i, n, l) = (Ai^3 + Bi^2 + Ci + D) \times G \exp(H.i) \times (h_i / 3.5) \quad (20)$$

$$CS_{Elastic}(i, h_i, n, l) = (Ai^3 + Bi^2 + Ci + D) \times G \exp(H.i) \times (h_i / 3.5) \quad (21)$$

$$CS_{Shrinkage}(i, h_i, n, l) = (Ei^F) \times (G.Ln(i) + H) \times (h_i / 3.5) \quad (22)$$

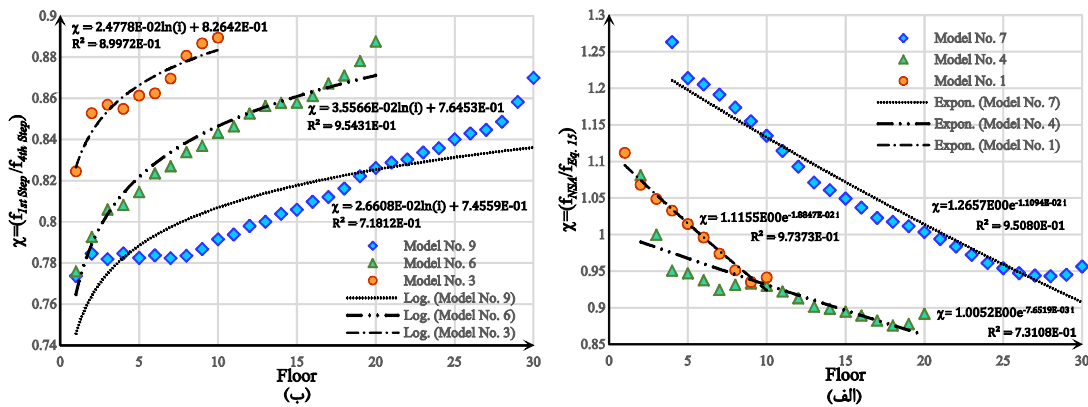
$$\begin{cases} A = a_1 n^2 + b_1 n + c_1, & B = d_1 n^2 + e_1 n + f_1, & C = g_1 n^2 + h_1 n + i_1 \\ D = j_1 n^2 + k_1 n + l_1, & E = m_1 \exp(n_1 n) & F = o_1 n^{p_1} \\ G = (a_2 l^2 + b_2 l + c_2) n^2 + (d_2 l^2 + e_2 l + f_2) n + (g_2 l^2 + h_2 l + i_2) \\ H = (j_2 l^2 + k_2 l + l_2) n^2 + (m_2 l^2 + n_2 l + o_2) n + (p_2 l^2 + q_2 l + r_2) \end{cases} \quad (23)$$

متغیرهای روابط فوق (i) شماره طبقه، (l) طول دهانه، (h_i) ارتفاع طبقه i و (n) تعداد طبقات سازه است. سایر پارامترها، ضرایبی ثابت با مقادیر مندرج در جدول ۵ برای ستون‌های تیپ C1 و C2 و جدول ۶ برای ستون‌های تیپ C3-I و C3-II می‌باشند.

قابل ذکر است که با جایگذاری اعداد ۱۰، ۲۰ و ۳۰ بجای n برای ابعاد دهانه پلان A (l=3.889 m) در مجموعه روابط ۱۸ و ۱۹، ۳ معادله اولیه شکل ۹-الف با تقریب بسیار قابل قبول حاصل خواهند شد. رابطه نهائی برآورد کوتاه‌شدگی ناشی از خزش ستون تیپ C1 حاصلضرب رابطه ۱۵ و رابطه ۱۷ و ضریب اثر ارتفاع طبقه عملیات (مرحله ۶) به شکل h_i/3.5 خواهد بود.

۳-۲- ارائه روابط نهائی پیشنهادی

با استفاده از الگوریتم مطرح شده شکل ۷ برای رفتار دراز مدت سازه‌های بتنی قابی شکل‌پذیر با طراحی مرسوم و بهینه بر اساس ضوابط ACI318-14، روابط ساده پیشنهادی تحقیق حاضر برای کوتاه‌شدگی‌های ناشی از خزش، آبرفتگی و تغییرات زمانی مدول الاستیسیته ستون‌ها بر حسب متر، به ترتیب مطابق روابط ۲۰ تا ۲۳ ارائه شده است.



شکل ۹: عملیات مرحله ۵ در تخمین کوتاه‌شدگی ستون نوع C1 در پلان نوع A ناشی از (الف) خزش (ب) آبرفتگی

Fig. 9. Operation Step 5 in the estimation of shortening due to a) creep of column C1 in plan type A, and b) shrinkage of column C3-II in plan type C

جدول ۵: ضرایب ثابت روابط (۲۰ تا ۲۳) برای ستون تیپ C1 و C2

Table 5. Constant coefficients of equations (20 to 23) for C1 and C2 column

C2			C1			ثابت
آبرفتگی	الاستیک	خزش	آبرفتگی	الاستیک	خزش	
-	$2/3315 \times 10^{-9}$	$2/3689 \times 10^{-9}$	-	$1/7132 \times 10^{-9}$	$1/9498 \times 10^{-9}$	a ₁
-	$-1/1716 \times 10^{-7}$	$-9/1821 \times 10^{-8}$	-	$-8/9331 \times 10^{-8}$	$-8/4736 \times 10^{-8}$	b ₁
-	$1/1842 \times 10^{-6}$	$-1/332 \times 10^{-8}$	-	$9/8222 \times 10^{-7}$	$2/9289 \times 10^{-7}$	c ₁
-	$-5/6682 \times 10^{-8}$	$-1/1974 \times 10^{-7}$	-	$-3/2629 \times 10^{-8}$	$-7/2789 \times 10^{-8}$	d ₁
-	$3/7967 \times 10^{-6}$	$7/2076 \times 10^{-6}$	-	$2/2522 \times 10^{-6}$	$4/5947 \times 10^{-6}$	e ₁
-	$-7/2416 \times 10^{-5}$	$-1/0.457 \times 10^{-7}$	-	$-4/687 \times 10^{-5}$	$-7/0.731 \times 10^{-5}$	f ₁

-	$-3/7.9 \times 10^{-7}$	$-6/16.0 \times 10^{-7}$	-	$-1/9345 \times 10^{-7}$	$-4/256.0 \times 10^{-7}$	g_1
-	$1/9951 \times 10^{-5}$	$2/2666 \times 10^{-5}$	-	$1/48.6 \times 10^{-5}$	$2/1812 \times 10^{-5}$	h_1
-	$2/4838 \times 10^{-5}$	$6/642.0 \times 10^{-5}$	-	$1/4281 \times 10^{-5}$	$3/8596 \times 10^{-5}$	i_1
-	$2/7653 \times 10^{-7}$	$6/41.2 \times 10^{-7}$	-	$1/1573 \times 10^{-7}$	$3/8916 \times 10^{-7}$	j_1
-	$-1/2441 \times 10^{-5}$	$-2/421.0 \times 10^{-5}$	-	$-7/521 \times 10^{-6}$	$-1/65.0 \times 10^{-5}$	k_1
-	$8/65.3 \times 10^{-5}$	$1/7493 \times 10^{-5}$	-	$4/556.0 \times 10^{-5}$	$1/1581 \times 10^{-5}$	l_1
$1/2325 \times 10^{-7}$	-	-	$1/2327 \times 10^{-7}$	-	-	m_1
$-2/2812 \times 10^{-7}$	-	-	$-2/2812 \times 10^{-7}$	-	-	n_1
$9/2849 \times 10^{-1}$	-	-	$9/2838 \times 10^{-1}$	-	-	o_1
$1/2646 \times 10^{-7}$	-	-	$1/2659 \times 10^{-7}$	-	-	p_1
$-1/7342 \times 10^{-5}$	$1/1774 \times 10^{-7}$	$1/2728 \times 10^{-7}$	$-1/7359 \times 10^{-5}$	$1/1935 \times 10^{-7}$	$1/2.91 \times 10^{-7}$	a_2
$1/9142 \times 10^{-7}$	$-1/328.0 \times 10^{-7}$	$-1/4362 \times 10^{-7}$	$1/9158 \times 10^{-7}$	$-1/3427 \times 10^{-7}$	$-1/3812 \times 10^{-7}$	b_2
$-5/0.3 \times 10^{-7}$	$3/5319 \times 10^{-7}$	$3/8176 \times 10^{-7}$	$-5/0.58 \times 10^{-7}$	$3/5625 \times 10^{-7}$	$3/7281 \times 10^{-7}$	c_2
$6/582.0 \times 10^{-7}$	$-4/8.17 \times 10^{-7}$	$-5/227.0 \times 10^{-7}$	$6/587.0 \times 10^{-7}$	$-4/8322 \times 10^{-7}$	$-5/1.0 \times 10^{-7}$	d_2
$-7/2489 \times 10^{-7}$	$5/3837 \times 10^{-1}$	$5/8645 \times 10^{-1}$	$-7/2532 \times 10^{-7}$	$5/4.29 \times 10^{-1}$	$5/6659 \times 10^{-1}$	e_2
$1/89.3 \times 10^{-1}$	$-1/4234$	$-1/55$	$1/89.9 \times 10^{-1}$	$-1/4248$	$-1/5124$	f_2
$-5/7124 \times 10^{-7}$	$4/39.2 \times 10^{-1}$	$4/8.92 \times 10^{-1}$	$-5/7.79 \times 10^{-7}$	$4/4.28 \times 10^{-1}$	$4/7.18 \times 10^{-1}$	g_2
$6/4612 \times 10^{-1}$	$-4/8357$	$-5/3428$	$6/4555 \times 10^{-1}$	$-4/8626$	$-5/2694$	h_2
$-1/73.2$	$1/3559 \times 10^1$	$1/4985 \times 10^1$	$-1/7284$	$1/3667 \times 10^1$	$1/4978 \times 10^1$	i_2
$5/7318 \times 10^{-5}$	$-6/414.0 \times 10^{-5}$	$-5/8241 \times 10^{-5}$	$5/7342 \times 10^{-5}$	$-6/782 \times 10^{-5}$	$-4/621.0 \times 10^{-5}$	j_2
$-6/421.0 \times 10^{-7}$	$7/2382 \times 10^{-5}$	$6/5384 \times 10^{-5}$	$-6/4228 \times 10^{-7}$	$6/8855 \times 10^{-5}$	$5/2724 \times 10^{-5}$	k_2
$1/7.81 \times 10^{-7}$	$-1/9277 \times 10^{-7}$	$-1/725.0 \times 10^{-7}$	$1/7.82 \times 10^{-7}$	$-1/8419 \times 10^{-7}$	$-1/4247 \times 10^{-7}$	l_2
$-2/241.0 \times 10^{-7}$	$2/6.04 \times 10^{-7}$	$2/3632 \times 10^{-7}$	$-2/2418 \times 10^{-7}$	$2/4521 \times 10^{-7}$	$1/8945 \times 10^{-7}$	m_2
$2/486.0 \times 10^{-1}$	$-2/9562 \times 10^{-7}$	$-2/6751 \times 10^{-7}$	$2/4867 \times 10^{-1}$	$-2/8.61 \times 10^{-7}$	$-2/176.0 \times 10^{-7}$	n_2
$-6/5493 \times 10^{-1}$	$7/9359 \times 10^{-7}$	$7/1193 \times 10^{-7}$	$-6/55.0 \times 10^{-1}$	$7/5892 \times 10^{-7}$	$5/9285 \times 10^{-7}$	o_2
$2/1.62 \times 10^{-1}$	$-2/3761 \times 10^{-7}$	$-2/1417 \times 10^{-7}$	$2/1.56 \times 10^{-1}$	$-2/2287 \times 10^{-7}$	$-1/7399 \times 10^{-7}$	p_2
$-2/4441$	$2/7787 \times 10^{-1}$	$2/5.54 \times 10^{-1}$	$-2/4433$	$2/6388 \times 10^{-1}$	$2/0.726 \times 10^{-1}$	q_2
$7/7215$	$-7/6749 \times 10^{-1}$	$-6/8923 \times 10^{-1}$	$-7/7184$	$-7/3793 \times 10^{-1}$	$-5/8755 \times 10^{-1}$	r_2

جدول ۶: ضرایب ثابت روابط ۲۰ تا ۲۳ برای ستون تیپ C3-I و C3-II

Table 6. Constant coefficients of equations (20 to 23) for C3-I and C3-II column

C3-II			C3-I			ثابت
آبرفتگی	الاستیک	خزش	آبرفتگی	الاستیک	خزش	
-	$3/0.413 \times 10^{-9}$	$2/4345 \times 10^{-9}$	-	$3/0.752 \times 10^{-9}$	$2/6718 \times 10^{-9}$	a_1

-	$-1/4379 \times 10^{-7}$	$-6/9826 \times 10^{-8}$	-	$-1/4797 \times 10^{-7}$	$-8/6274 \times 10^{-8}$	b_1
-	$1/2182 \times 10^{-6}$	$-9/5059 \times 10^{-7}$	-	$1/3332 \times 10^{-6}$	$-6/2324 \times 10^{-7}$	c_1
-	$-1/0.314 \times 10^{-7}$	$-1/98.6 \times 10^{-7}$	-	$-9/55.0 \times 10^{-8}$	$-1/8834 \times 10^{-7}$	d_1
-	$6/6.33 \times 10^{-6}$	$1/1384 \times 10^{-5}$	-	$6/1732 \times 10^{-6}$	$1/0.916 \times 10^{-5}$	e_1
-	$-1/1466 \times 10^{-6}$	$-1/5576 \times 10^{-6}$	-	$-1/0.925 \times 10^{-6}$	$-1/50.99 \times 10^{-6}$	f_1
-	$-5/9215 \times 10^{-7}$	$-7/5635 \times 10^{-7}$	-	$-5/7125 \times 10^{-7}$	$-7/6820 \times 10^{-7}$	g_1
-	$2/3654 \times 10^{-5}$	$1/5330 \times 10^{-5}$	-	$2/3986 \times 10^{-5}$	$1/79.6 \times 10^{-5}$	h_1
-	$4/6290 \times 10^{-6}$	$1/1783 \times 10^{-6}$	-	$4/2525 \times 10^{-6}$	$1/0.999 \times 10^{-6}$	i_1
-	$5/1253 \times 10^{-7}$	$9/740.6 \times 10^{-7}$	-	$4/7852 \times 10^{-7}$	$9/4184 \times 10^{-7}$	j_1
-	$-1/90.75 \times 10^{-5}$	$-3/3346 \times 10^{-5}$	-	$-1/8388 \times 10^{-5}$	$-3/2752 \times 10^{-5}$	k_1
-	$1/4166 \times 10^{-7}$	$2/5853 \times 10^{-6}$	-	$1/3416 \times 10^{-6}$	$2/4866 \times 10^{-6}$	l_1
$1/2327 \times 10^{-6}$	-	-	$1/2327 \times 10^{-6}$	-	-	m_1
$-2/2812 \times 10^{-6}$	-	-	$-2/2812 \times 10^{-6}$	-	-	n_1
$9/2842 \times 10^{-1}$	-	-	$9/2836 \times 10^{-1}$	-	-	o_1
$1/2653 \times 10^{-6}$	-	-	$1/2674 \times 10^{-6}$	-	-	p_1
$-1/7353 \times 10^{-6}$	$1/2694 \times 10^{-6}$	$1/2431 \times 10^{-6}$	$-1/7334 \times 10^{-6}$	$1/1642 \times 10^{-6}$	$1/2552 \times 10^{-6}$	a_2
$1/9162 \times 10^{-6}$	$-1/4418 \times 10^{-6}$	$-1/4037 \times 10^{-6}$	$1/9137 \times 10^{-6}$	$-1/3150 \times 10^{-6}$	$-1/4181 \times 10^{-6}$	b_2
$-5/0.95 \times 10^{-6}$	$3/8744 \times 10^{-6}$	$3/7330 \times 10^{-6}$	$-5/0.23 \times 10^{-6}$	$3/50.22 \times 10^{-6}$	$3/7733 \times 10^{-6}$	c_2
$6/5848 \times 10^{-6}$	$-5/1446 \times 10^{-6}$	$-5/1277 \times 10^{-6}$	$6/5788 \times 10^{-6}$	$-4/7768 \times 10^{-6}$	$-5/1767 \times 10^{-6}$	d_2
$-7/2553 \times 10^{-6}$	$5/810.8 \times 10^{-1}$	$5/7614 \times 10^{-1}$	$-7/2467 \times 10^{-6}$	$5/3716 \times 10^{-1}$	$5/8226 \times 10^{-1}$	e_2
$1/8925 \times 10^{-1}$	$-1/5524$	$-1/5249$	$1/8900 \times 10^{-1}$	$-1/4243$	$-1/5428$	f_2
$-5/7128 \times 10^{-6}$	$5/4275 \times 10^{-1}$	$4/70.86 \times 10^{-1}$	$-5/710.8 \times 10^{-6}$	$4/3632 \times 10^{-1}$	$4/7514 \times 10^{-1}$	g_2
$6/4642 \times 10^{-1}$	$-6/0.792$	$-5/2271$	$6/4601 \times 10^{-1}$	$-4/8195$	$-5/2919$	h_2
$-1/7314$	$1/7187 \times 10^{-1}$	$1/4672 \times 10^{-1}$	$-1/7301$	$1/3551 \times 10^{-1}$	$1/4888 \times 10^{-1}$	i_2
$5/7331 \times 10^{-6}$	$-6/6483 \times 10^{-1}$	$-6/0.364 \times 10^{-5}$	$5/7318 \times 10^{-6}$	$-6/670.2 \times 10^{-5}$	$-6/0.347 \times 10^{-5}$	j_2
$-6/4241 \times 10^{-6}$	$7/4790 \times 10^{-6}$	$6/7768 \times 10^{-6}$	$-6/4217 \times 10^{-6}$	$7/5051 \times 10^{-6}$	$6/7727 \times 10^{-6}$	k_2
$1/70.91 \times 10^{-6}$	$-1/9845 \times 10^{-6}$	$-1/7885 \times 10^{-6}$	$1/70.84 \times 10^{-6}$	$-1/9919 \times 10^{-6}$	$-1/7864 \times 10^{-6}$	l_2
$-2/2412 \times 10^{-6}$	$2/710.9 \times 10^{-6}$	$2/4668 \times 10^{-6}$	$-2/2410 \times 10^{-6}$	$2/7188 \times 10^{-6}$	$2/4651 \times 10^{-6}$	m_2
$2/4870 \times 10^{-1}$	$-3/0.668 \times 10^{-6}$	$-2/7916 \times 10^{-6}$	$2/4863 \times 10^{-1}$	$3/0.756 \times 10^{-6}$	$-2/7879 \times 10^{-6}$	n_2
$-6/5533 \times 10^{-1}$	$8/1874 \times 10^{-6}$	$7/430.3 \times 10^{-6}$	$-6/5511 \times 10^{-1}$	$8/20.99 \times 10^{-6}$	-4137×10^{-6}	o_2
$2/10.61 \times 10^{-1}$	$-2/4972 \times 10^{-6}$	$-2/2629 \times 10^{-6}$	$2/10.64 \times 10^{-1}$	$-2/50.3 \times 10^{-6}$	$-2/2602 \times 10^{-6}$	p_2
$-2/446$	$2/8952 \times 10^{-1}$	$2/6428 \times 10^{-1}$	$-2/4446$	$2/8956 \times 10^{-1}$	$-2/6359 \times 10^{-1}$	q_2
$7/7238$	$-7/9279 \times 10^{-1}$	$-7/2625 \times 10^{-1}$	$7/7230$	$-7/9168 \times 10^{-1}$	$-7/2304 \times 10^{-1}$	r_2

آزمایشی شماره ۱، ۲ و ۳، به ترتیب ستونی از تیپ C3-I و C1، C3-II، مطابق دسته‌بندی شکل ۵ جهت امر صحت سنجی انتخاب شده است. مقادیر برای ستون‌های مدل‌های آزمایشی ۱، ۲ و ۳ بر اساس رابطه ۱۲، به ترتیب برابر ۰/۱۵۹، ۰/۳۶۴ و ۰/۳۵۵ حاصل می‌شود. با توجه به تعداد طبقات ۱۶، ۲۴ و ۲۸ مدل‌های مذکور، ستون انتخابی مدل آزمایشی شماره ۱ در داخل محدوده پیشنهادی رابطه ۱۱ و ستون مدل‌های آزمایشی شماره ۲ و ۳ در محدوده پیشنهادی رابطه ۱۳ قرار می‌گیرند که مؤید صحت روابط ۱۱ تا ۱۳ است.

نتایج حاصل از آنالیز دقیق غیر خطی مرحله‌ای مدل‌های صحت سنجی (NSA) و مقادیر متناظر حاصله از روابط ساده پیشنهادی تحقیق حاضر، برای کوتاه‌شدگی‌های خزشی، آبرفتگی و الاستیک هر یک از مدل‌های آزمایشی شماره ۱، ۲، ۳ و دو مدل ۴ و ۵ به ترتیب در شکل ۱۱-الف تا ت نشان داده شده است. همان‌طور که در اشکال ۱۱-الف تا پ مشاهده می‌شود، روابط پیشنهادی به بهترین و ساده‌ترین شکل ممکن، کوتاه‌شدگی‌های دراز مدت ستون‌ها را با خطای متوسط کمتر از ۱/۸۷ درصد برای کلیه مقادیر مورد بررسی و تقریباً منطبق بر مقادیر دقیق برآورد نموده‌اند که مؤید امکان ارائه نهائی هر ۳ رابطه ۲۰ تا ۲۲ برای سازه‌های قابی تا سقف ۳۰ طبقه است.

۴-۲- سازه‌های بتنی قابی شکل‌پذیر بیشتر از ۳۰ طبقه

به منظور صحت‌سنجی روابط پیشنهادی کوتاه‌شدگی برای سازه‌های خارج از محدوده طبقاتی ۳۰ طبقه، دو مدل آزمایشی شماره ۴ و ۵، به ترتیب با تعداد ۳۲ و ۴۰ طبقه مد نظر می‌باشند. مدل آزمایشی شماره ۴، با تعداد ۳۲ طبقه، طول دهانه ۶ و ارتفاع طبقه ۳/۸ متر و مدل آزمایشی شماره ۵، با تعداد ۴۰ طبقه، طول دهانه ۶ و ارتفاع طبقه ۳ متر، صحت روابط پیشنهادی کوتاه‌شدگی را به ترتیب برای ستون تیپ C3-I و ستون تیپ C2 مورد آزمایش قرار می‌دهند. پلان سازه‌ها و نتایج حاصل از طراحی بهینه بر اساس آنالیز متداول دو مدل مذکور برای مقاطع اعضای سازه، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتایج حاصل از آنالیز دقیق غیر خطی مرحله‌ای دو مدل مورد بررسی و مقادیر متناظر حاصله از روابط ساده پیشنهادی تحقیق حاضر، نشان می‌دهد که روابط پیشنهادی برای کوتاه‌شدگی ناشی از خزش و تغییرات زمانی مدول الاستیسیته، با خطای قابل توجه برای دو مدل مربوطه و علی‌الخصوص برای مدل شماره ۵، ۴۰ طبقه همراه بوده و از این رو، به هیچ عنوان استفاده از روابط ۲۰ و ۲۱ برای سازه‌های قابی بلندتر از ۳۰ طبقه توصیه نمی‌شود. لیکن رابطه ۲۲، مقادیر کوتاه‌شدگی ناشی از آبرفتگی ستون‌ها را مطابق شکل ۱۱-ت با تقریب بسیار مناسب و با خطای متوسط کمتر از ۰/۲۳ و ۱۲/۰۷ درصد به ترتیب نسبت به مقادیر دقیق ناشی از آنالیز غیرخطی مرحله‌ای مدل‌های آزمایشی شماره ۴ و ۵ تخمین زده است. مطلب فوق‌الذکر مؤید صادق بودن رابطه ۲۲ حتی برای سازه‌های بلندتر از محدوده طبقاتی ۳۰ طبقه و امکان استفاده از آن برای کلیه سازه‌های قابی بلند مرتبه می‌باشد.

همان‌طور که در جداول ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، ثابت‌های آبرفتگی برای کلیه ۴ تیپ ستون تعریف شده تقریباً مقادیر یکسانی دارد. شباهت تقریبی ضرایب مذکور بین انواع ۴ تیپ ستون مورد بررسی، هم در خصوص ثابت‌های $(m_1$ تا $p_1)$ و هم برای ثابت‌های $(a_2$ تا $T_2)$ مؤید عدم وابستگی رابطه آبرفتگی پیشنهادی رابطه ۲۲ از سهم بارگیر و موقعیت قرارگیری ستون در پلان سازه می‌باشد. از این رو، ضرایب آبرفتگی هر یک از ۴ سری ارائه شده در جداول ۵ و ۶ با تقریب بسیار خوبی قادر به پیش‌بینی کوتاه‌شدگی آبرفتگی سایر تیپ‌های ستون تعریف شده است.

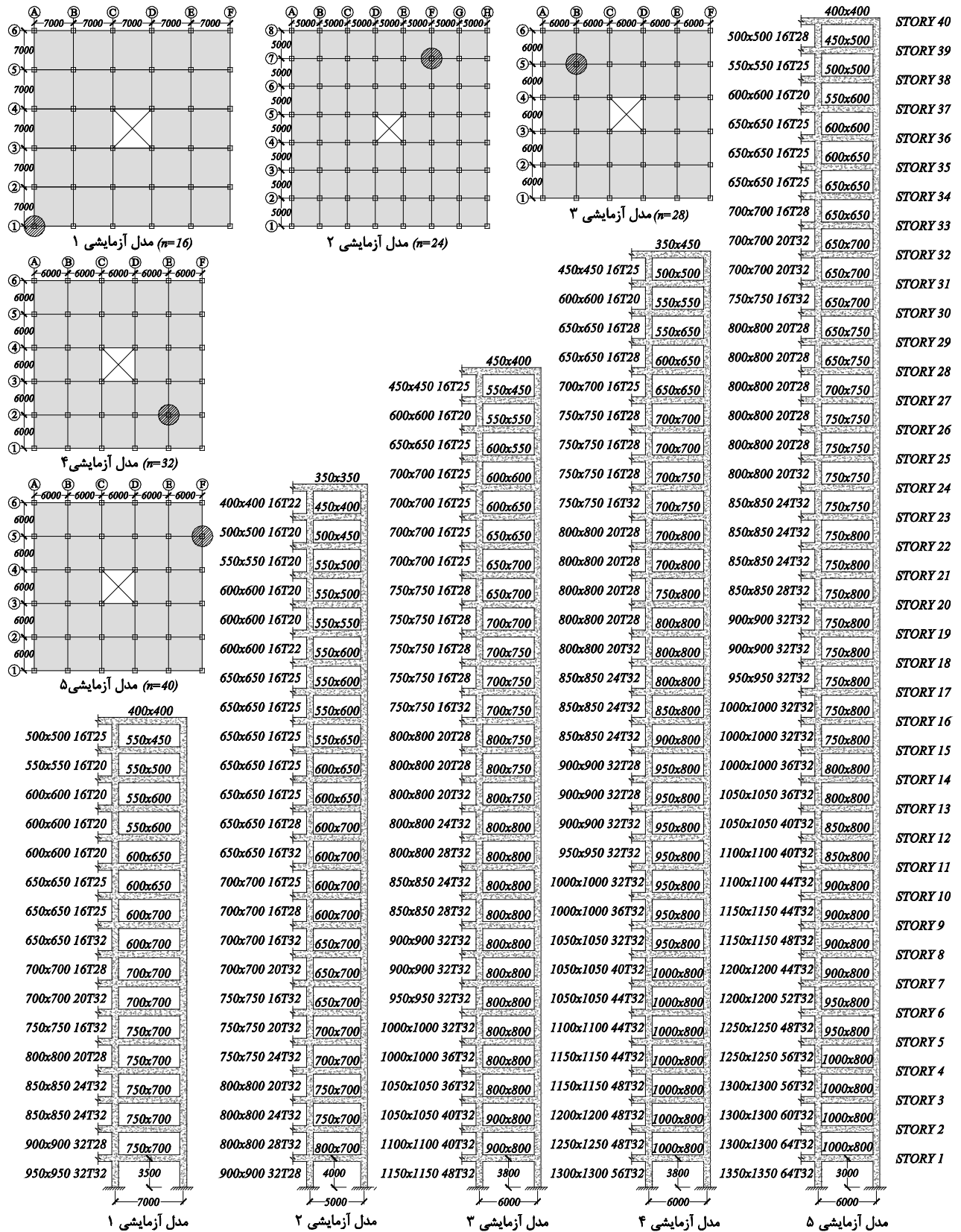
۴-۳- صحت سنجی روابط پیشنهادی

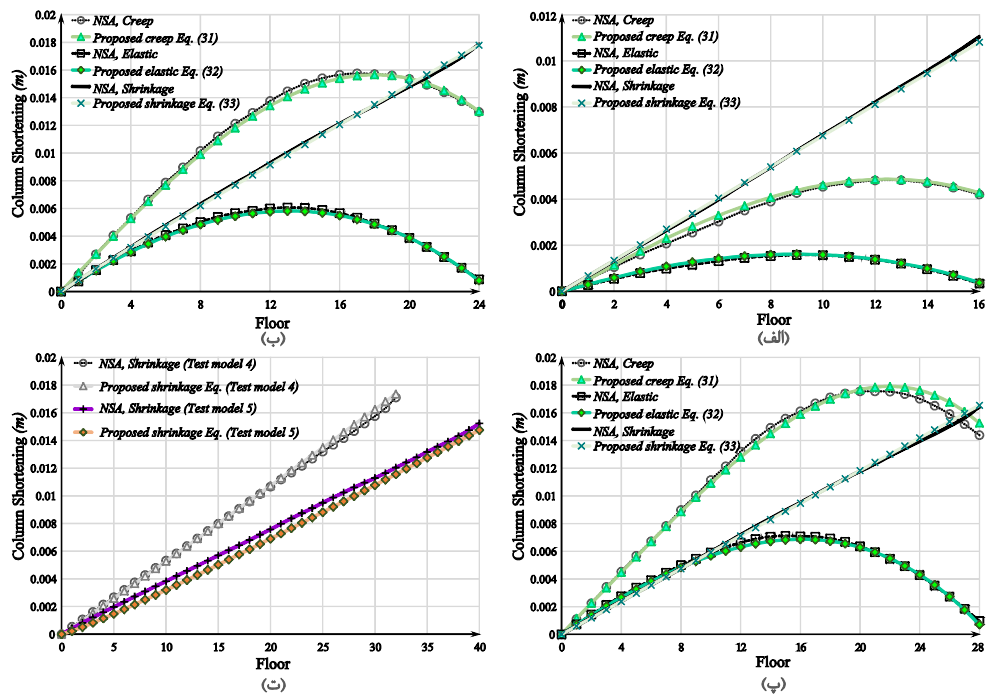
همان‌طور که قبلاً عنوان شد، کاربرد روابط پیشنهادی تحقیق حاضر در محدوده طبقاتی تا سقف ۳۰ طبقه، برای سازه‌های قاب خمشی بتنی با شکل‌پذیری ویژه می‌باشد. محدوده مذکور، محدوده‌ای از سازه‌های قابی است که در آن معمولاً طرح سازه با سیستم قاب خمشی توجیه اقتصادی داشته و اصولاً برای سازه‌های بلند مرتبه‌تر، به دلیل مقاطع بسیار بزرگ اعضای سازه جهت مقابله با بارهای جانبی، می‌بایست از دیگر سیستم‌های سازه‌ای سود برد. از این رو تمرکز اصلی مقاله در بحث صحت سنجی نتایج نیز در داخل محدوده طبقاتی یاد شده بوده و مدل‌سازی‌های مجدد، با مشخصات هندسی (ابعاد دهانه، ارتفاع طبقه و تعداد طبقات سازه) متفاوت از مدل‌های مولد روابط پیشنهادی، جهت صحت سنجی روابط مذکور صورت گرفته است. علاوه بر این، مدل‌سازی سازه‌های قابی با بیش از ۳۰ طبقه نیز، جهت آزمایش روابط پیشنهادی در خارج از محدوده طبقاتی یاد شده، انجام شده است که در ادامه معرفی می‌گردند.

۴-۱- سازه‌های بتنی قابی شکل‌پذیر تا ۳۰ طبقه

از آنجا که متغیرهای هندسی منعکس شده در روابط پیشنهادی ۲۰ تا ۲۳ شامل طول دهانه، ارتفاع و تعداد طبقات سازه می‌باشد، سه مدل آزمایشی با شماره‌های ۱، ۲ و ۳ با مشخصات مشروحه ذیل جهت صحت‌سنجی روابط پیشنهادی انتخاب شده است. در مدل آزمایشی شماره ۱، با تعداد ۱۶ طبقه، طول دهانه ۷ و ارتفاع طبقه ۳/۵ متر، صحت روابط ارائه شده برای ستون تیپ C1 تنها ناشی از اثر تغییر در تعداد طبقه سازه بررسی می‌شود. مدل آزمایشی شماره ۲، با تعداد ۲۴ طبقه، طول دهانه ۵ و ارتفاع طبقه ۴ متر، اثر تغییر توأمان در ارتفاع و تعداد طبقات سازه را جهت صحت سنجی روابط کوتاه‌شدگی ستون تیپ C3-II مورد آزمایش قرار داده و مدل آزمایشی شماره ۳، با تعداد ۲۸ طبقه و طول دهانه ۶ و ارتفاع طبقه ۳/۸ متر، صحت روابط ارائه شده برای ستون تیپ C3-I را تحت شرایط تغییر در هر سه متغیر هندسی روابط مذکور بررسی می‌نماید. نتایج حاصل از طراحی بهینه و متداول سه مدل مذکور برای مقاطع اعضای سازه‌ها، در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، در پلان هر یک از مدل‌های





شکل ۱۱: مقایسه کوتاه شدگی‌های دراز مدت مدل آزمایشی الف) ۱) ب) ۲) پ) ۳) ت) ۴) و ۵

Fig. 11. Comparison of long term shortening in test model a) number 1 b) number 2 c) number 3 and d) number 4&5

شده، تقریباً یکسان می‌باشد و لذا رابطه پیشنهادی آب رفتگی مستقل از موقعیت و سهم بارگیر ستون بوده و ضرایب آب رفتگی هر یک از ۴ تیپ ستون ارائه شده، با تقریب بسیار خوب، قادر به پیش‌بینی کوتاه شدگی‌های آب رفتگی کلیه ستون‌های سازه است.

• حساسیت ستون‌های مدل‌های تحقیق حاضر به رفتار دراز مدت مرحله‌ای، در قالب درصد تغییرات کرنش محوری مرحله ای (شامل اثرات دراز مدت) نسبت به کرنش محوری متداول (فاقد اثرات دراز مدت)، با افزایش تعداد طبقات سازه تقریباً از ۱۰ طبقه، افزایش چشمگیر خواهد داشت.

مراجع

- [1] O. Esmaili, S. Epackachi, R. Mirghaderi, M. Ghalibafian, A. Taheri, Evaluation of the construction sequence loading effects on seismic performance of high-rise buildings with different structural systems, in: Proceedings of Ninth Canadian Conference on Earthquake Engineering, 2007, pp. 729-738.
- [2] H.-G. Kwak, J.-K. Kim, Time-dependent analysis of RC frame structures considering construction sequences, Building and Environment, 41(10) (2006) 1423-1434.
- [3] C.-K. Choi, E.-D. Kim, Multistory frames under sequential gravity loads, Journal of Structural Engineering, 111(11) (1985) 2373-2384.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله با انجام مطالعات پارامتریک و مدلسازی‌های گسترده، رفتار دراز مدت سازه‌های بتنی قاب خمشی در قالب کوتاه شدگی‌های وابسته به زمان ستون در روز ۱۰۰۰ ام ساخت (به عنوان شاخص زمانی که در آن اعم کرنش‌های غیر الاستیک بتن رخ داده است)، تحت آنالیزهای متعدد غیر خطی مرحله‌ای مورد بررسی قرار گرفت و روابط تجربی ساده، ارائه و محدوده‌های کاربرد روابط مذکور نیز پیشنهاد گردید. سادگی روابط پیشنهادی به لحاظ وابستگی آن تنها به مشخصات هندسی شامل ابعاد دهانه، ارتفاع و تعداد طبقات و استقلال آن از پارامترهای مرسوم تخمین کوتاه‌شدگی ستون در ضوابط CEB-FIP 90، از مزایای روش تحقیق حاضر است. نتایج حاصله از بررسی‌های این تحقیق نشان می‌دهد:

- کلیه روابط پیشنهادی با ضرایب ارائه شده، برای تمامی سازه‌های بتنی قاب خمشی تا سقف ۳۰ طبقه، که طرح آن‌ها به شکل بهینه و بر اساس آنالیزهای متداول یک مرحله‌ای فاقد اثرات دراز مدت و منطبق بر ضوابط ACI318-14 و فرضیات ابتدائی مقاله می‌باشد، معتبر بوده و برای تخمین کوتاه‌شدگی انواع تیپ‌های ستون تعریف شده مقاله حاضر، می‌توان از روابط ساده مذکور بجای آنالیزهای زمان بر غیرخطی مرحله‌ای استفاده کرد.
- رابطه پیشنهادی مقاله حاضر در خصوص کوتاه‌شدگی ناشی از آب رفتگی حتی برای سازه‌های بلندتر از محدوده طبقاتی ۳۰ طبقه نیز صادق بوده و با درصد خطای قابل قبول، قادر به برآورد اثر آب رفتگی ستون می‌باشد.
- ضرایب ثابت آب رفتگی ارائه شده برای تمامی انواع ستون‌های تعریف

- [14] J. Lu, J. Wu, X. Luo, Q. Zhang, Time-dependent analysis of steel-reinforced concrete structures, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 22(15) (2013) 1186-1198.
- [15] M.J. Afshari, A. Kheyroddin, M. Gholhaki, Simplified Time-Dependent Column Shortening Analysis in Special Reinforced Concrete Moment Frames, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(1) (2018) 232-249.
- [16] M.J. Afshari, A. Kheyroddin, M. Gholhaki, Simplified sequential construction analysis of buildings with the new proposed method, *Structural Engineering and Mechanics*, 63(1) (2017) 77-88.
- [17] H.S. Saffarini, *New approaches in the structural analysis of building systems*, University Microfilms, 1983.
- [18] S. Epackachi, R. Mirghaderi, O. Esmaili, A.A.T. Behbahani, S. Vahdani, Seismic evaluation of a 56-storey residential reinforced concrete high-rise building based on nonlinear dynamic time-history analyses, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 21(4) (2012) 233-248.
- [19] ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)*, 2014.
- [20] Comite Euro-International du Beton. CEB-FIP Model Code 1990: Design code, Thomas Telford services Ltd, Lausanne, Switzerland, 1993.
- [21] ETABS2015 Technical Reference Manual. Integrated Building Design Software, in, Computer and Structures Inc., Berkeley, (California, USA), 2015.
- [22] M. Fintel, F.R. Khan, Effects of column creep and shrinkage in tall structures-Prediction of inelastic column shortening, in: *Journal Proceedings*, 1969, pp. 957-967.
- [23] Midas Gen 2015 Analysis Reference Manual-General Structural Design System Software, in, Midas IT, 2015.
- [24] ASCE Standard, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE 7-10)*, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2010.
- [25] M.J. Afshari, A. Kheyroddin, M. Gholhaki, The effect of constant and seasonal changes of ambient conditions on long-term behavior of high-rise concrete structures, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 27(18) (2018) e1548.
- [4] H.S. Kim, S.H. Jeong, S.H. Shin, Column shortening analysis of tall buildings with lumped construction sequences, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 21(10) (2012) 764-776.
- [5] W. Njomo, G. Ozay, Sequential analysis coupled with optimized substructure technique modeled on 3D-frame construction process, *Engineering Structures*, 80 (2014) 200-210.
- [6] C.-K. Choi, H.-K. Chung, D.-G. Lee, E. Wilson, Simplified building analysis with sequential dead loads—CFM, *Journal of Structural Engineering*, 118(4) (1992) 944-954.
- [7] H.S. Kim, S.H. Jeong, S.H. Shin, J.P. Park, Simplified column shortening analysis of a multi-storey reinforced concrete frame, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 21(6) (2012) 405-415.
- [8] H.S. Kim, Effect of horizontal members on column shortening of reinforced concrete building structures, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 22(5) (2013) 440-453.
- [9] H.S. Kim, Optimum distribution of additional reinforcement to reduce differential column shortening, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 24(10) (2015) 724-738.
- [10] R. Sharma, S. Maru, A. Nagpal, Effect of beam stiffness-column reinforcement on creep and shrinkage behaviour of RC frames, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 18(3) (2009) 327-339.
- [11] W.W. Njomo, G. Ozay, Minimization of differential column shortening and sequential analysis of RC 3D-frames using ANN, *Structural Engineering and Mechanics*, 51(6) (2014) 989-1003.
- [12] S. Woo Park, S. Woon Choi, H. Seon Park, Moving average correction method for compensation of differential column shortenings in high-rise buildings, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 22(9) (2013) 718-728.
- [13] P. Moragaspiya, D. Thambiratnam, N. Perera, T. Chan, A numerical method to quantify differential axial shortening in concrete buildings, *Engineering Structures*, 32(8) (2010) 2310-2317.

Please cite this article using:

M. Jalilzadeh Afshari, A. Kheyroddin, A New Simplified Method of Time-dependent Column Shortening Analysis in Concrete Moment Frames, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(5) (2018) 887-906.

DOI: 10.22060/ceej.2017.12625.5233

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



