

بررسی تأثیر شکل‌بندی مهاربندها در قاب‌های فولادی دوبعدی در رفتار این قاب‌ها با استفاده از تحلیل غیرارتجاعی مرتبه‌ی دوم

وحید اقتصادی* (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندرعباس

محسن گرامی (استادیار)

پژوهشکده‌ی فناوری‌های نوین، دانشگاه سمنان

مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۳۹۳)
دوری ۲-۳، شماره ۲، ص. ۶۰-۴۷

در این نوشتار، تأثیر نحوه‌ی قرارگیری مهاربندها در رفتار قاب‌های فولادی دوبعدی با استفاده از حل مثال‌های عددی بررسی شده است. سه قاب خمشی فولادی دوبعدی با شکل‌بندی و حالات بارگذاری مختلف، توسط یک تحلیل غیرارتجاعی مرتبه‌ی دوم، تحلیل و نمودار نیرو- تغییر مکان جانبی هر حالت رسم شده است. سپس با رگرسیون‌گیری خطی از این نمودارها ضریب سختی جانبی جدیدی تعریف شده است که چکیده‌ی رفتار سازه است. روش مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار «ANSYS» می‌تواند ضریب بار نهایی قاب «وگل» را با خطای بیشینه‌ی ۳/۰٪ نسبت به روش‌های تحلیل ناحیه‌ی خمیری «وگل» و تحلیل مفصل خمیری «کیم و همکاران» برآورد کند. همچنین با حدود هشتمین تحلیل انجام‌شده در این پژوهش مشخص شد که آرایش مهاربندها در سازه می‌تواند تا چندین برابر مقاومت نهایی، تغییر مکان نهایی و سختی جانبی سازه را افزایش و یا کاهش دهد.

واژگان کلیدی: مهاربند، غیرخطی هندسی، غیرخطی مواد، اثرهای مرتبه‌ی دوم، اثرات غیرارتجاعی، ANSYS.

۱. مقدمه

قاب‌ها، یکی از پرکاربردترین سیستم‌های سازه‌ی هستند. در ایران، قاب‌های مهاربندی‌شده کاربرد فراوانی دارند. در گذشته، قاب‌ها با روش‌های ساده و نگره‌هایی نه چندان پیچیده تحلیل و طراحی می‌شدند. ولی با پیشرفت رایانه‌ها و توانایی برنامه‌نویسی با آنها، شبیه‌سازی بسیاری از ویژگی‌های رفتاری در سطحی عالی امکان‌پذیر است. عامل‌های گوناگونی در رفتار سازه‌ها اثر می‌گذارد. برخی از آنها عبارتند از: اثرهای مرتبه‌ی دوم، توزیع مجدد نیروهای داخلی به سبب شکل‌گیری مفاصل خمیری، تنش‌های پسماند، کاهش سختی جزء به سبب جاری شدن فولاد، نقص‌های هندسی اولیه، غیرخطی اتصال، تغییر شکل‌های برشی و اندرکنش سازه با پی و خاک. این اثرها را می‌توان به دو گروه کلی غیرخطی مواد و غیرخطی هندسی تقسیم کرد. برای نمونه، اثر جاری شدن مواد و تنش‌های پسماند در گروه نخست و نقص‌های هندسی و اثرهای مرتبه‌ی دوم در گروه دوم قرار می‌گیرند. در ادامه، برخی از مهم‌ترین این عوامل به اختصار تشریح می‌شوند:

اثرهای مرتبه‌ی دوم: تیر- ستون‌های قاب‌ها، زیر اثر لنگر خمشی و نیروی محوری قرار دارند. لنگر خمشی در تیر- ستون‌ها شامل لنگرهای مرتبه‌ی اول و مرتبه‌ی دوم

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۳/۳، اصلاحیه ۱۳۹۱/۶/۱۲، پذیرش ۱۳۹۱/۷/۳.

vahideghtesadi@yahoo.com
mgerami@semnan.ac.ir

می‌شود. لنگرهای مرتبه‌ی اول در اثر بارگذاری عرضی متمرکز یا گسترده و لنگرهای مرتبه‌ی دوم از اثر نیروی محوری بر تغییر شکل‌های جانبی اعضا به وجود می‌آید. عامل‌هایی که سبب ایجاد لنگرهای مرتبه‌ی دوم می‌شوند، اثرهای مرتبه‌ی دوم نام دارند. در قاب‌ها، اثرهای مرتبه‌ی دوم $P - \delta$ و $P - \Delta$ اهمیت بیشتری دارند.

توزیع مجدد نیروهای داخلی به سبب شکل‌گیری مفاصل خمیری: در یک سازه با افزایش بارها، یک مفصل خمیری در موقعیت لنگر بیشینه تشکیل می‌شود. هیچ لنگر اضافی در این موقعیت تحمل نمی‌شود و نمی‌تواند به بخش‌های دیگر سازه پخش شود. این روند، توزیع مجدد نیروهای داخلی نامیده می‌شود.

جاری شدن مواد: تغییر تنش در یک مقطع زیر اثر لنگر خمشی و نیروی محوری، ارتباط مستقیمی به مقدار نیروها دارد. با افزایش نیروها، دورترین تار فشاری به تنش جاری شدن می‌رسد و در پایان کل مقطع جاری می‌شود.

نقص‌های هندسی: در حالت کلی، نقص‌های هندسی بر اثر خطاهای غیر قابل اجتناب در فرآیند ساخت و نصب عضوهای سازه به وجود می‌آیند. در قاب‌ها، نقص مایل بودن عضو و انحنا یا شکم‌دادگی آن اهمیت بیشتری دارند.

جهت وارد کردن هر یک از عوامل مذکور در تحلیل، راهکارهای گوناگونی توسط

پژوهشگران و دستورالعمل‌های طراحی پیشنهاد شده است. برای نمونه، دستورالعمل «AISC-LRFD»^[۱] به دلیل اینکه در زمان تنظیم این دستورالعمل قدرت رایانه‌ها از لحاظ سخت‌افزاری و نرم‌افزاری پایین بوده است، با استفاده از ضرایب طول مؤثر، ضرایب تشدید و روابط طراحی اندرکنش، این اثرها را وارد روند تحلیل و طراحی می‌کند.

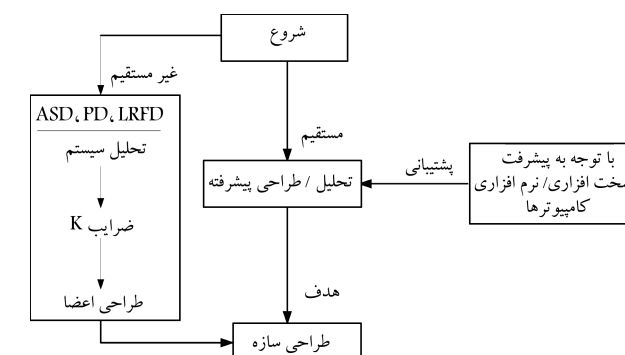
تحلیل‌های پیشرفته‌ی غیرارتجاعی مرتبه‌ی دوم می‌توانند تمام عوامل مذکور را مستقیماً در روند تحلیل وارد کنند. این روش‌ها تحلیل و طراحی را به هم پیوند می‌دهند و طراحان را از به کار بردن روابط طراحی که دستورالعمل‌های مختلف ذکر کرده‌اند، بی‌نیاز می‌گردانند. با قدرتی که رایانه‌های موجود از لحاظ سخت‌افزاری و نرم‌افزاری پیدا کرده‌اند، امید می‌رود که این روش‌ها بتوانند به زودی به روش مرسوم تحلیل - طراحی سازه‌ها تبدیل شوند.

برخی از نرم‌افزارها و برنامه‌های رایانه‌ی توانایی انجام تحلیل‌های پیشرفته‌ی غیرارتجاعی مرتبه‌ی دوم را دارند. از این میان می‌توان از «ANSYS»^[۲]، «ABAQUS»^[۳] نام برد. در این نوشتار، تمام تحلیل‌ها با نرم‌افزار «ANSYS» انجام شده است.

تحلیل پیشرفته، به هر نوع تحلیل سازه می‌گویند که مقاومت و پایداری یک سیستم سازه و اعضای منفرد آن را به گونه‌ی تعیین کند، که نیازی به کنترل ظرفیت اعضای منفرد و همچنین تعیین ضرایب طول مؤثر (k) نباشد (شکل ۱). این روش اطلاعات زیادی در مورد رفتار سازه در اثر اعمال بارهای خارجی و شرایط محیطی به طراحان می‌دهد.

انواع روش‌های انجام تحلیل پیشرفته عبارت‌اند از: روش مفصل ارتجاعی - خمیری، روش مفصل خمیری اصلاح شده، روش تحلیل ناحیه‌ی خمیری.

روش مفصل ارتجاعی - خمیری، ساده‌ترین تقریب از رفتار غیرارتجاعی مواد با فرض اینکه همه‌ی اثرهای غیرارتجاعی در محل مفصل خمیری متمرکز شده است، می‌باشد. در این ایده‌آل‌سازی فرض می‌شود که جزء‌ها به جز در انتها، جایی که مفاصل خمیری با طول صفر می‌توانند شکل بگیرند، ارتجاعی باقی می‌مانند. این روش انتشار جاری شدن یا خمیری شدن در مقطع، یا اثر تنش‌های پسماند را نادیده می‌گیرد. روش مفصل ارتجاعی - خمیری ممکن است به تحلیل مرتبه‌ی اول و مرتبه‌ی دوم خمیری تقسیم شود. در روش مفصل ارتجاعی - خمیری مرتبه‌ی اول، هندسه‌ی تغییرشکل نیافته یا اولیه‌ی عضو استفاده می‌شود و از تأثیرهای غیرخطی هندسی چشم‌پوشی می‌شود. در تحلیل ارتجاعی - خمیری مرتبه‌ی دوم، هندسه‌ی تغییرشکل یافته‌ی عضو مدنظر است و غیرخطی‌های هندسی شامل تأثیرهای مرتبه‌ی دوم را می‌توان با استفاده از توابع پایداری و فقط با یک جزء تیر - ستون در هر عضو حساب کرد^[۴].



شکل ۱. خصوصیات روش‌های مختلف تحلیل و طراحی.

روش‌های مفصل خمیری اصلاح شده، مبتنی بر برخی اصلاحات ساده در روش مفصل ارتجاعی - خمیری است. نظریه‌ی بار مجازی اولین تغییر وارد شده در روش مفصل ارتجاعی - خمیری است. بارهای جانبی مجازی معادل اضافی برای احتساب تأثیر تنش‌های پسماند، نقص‌های عضو و توزیع خمیری شدن، که در شیوه‌های رایج، از اثر آنها صرف نظر شده است، به کار می‌روند. با اصلاحات مسلم، این روش در آیین‌نامه‌ی اروپا، استاندارد کانادا و استاندارد استرالیا، برای طراحی ساختمان‌های فولادی پذیرفته شده است^[۵]. با این وجود، پژوهشی در سال ۱۹۹۲ نشان می‌دهد که این روش مقاومت ستون‌های مختلف قاب‌ها را بیش از ۲۰٪ کمتر و مقاومت تیر - ستون‌های تحت تأثیر بار محوری و لنگرهای خمشی را حدود ۱۰٪ بیشتر پیشگویی می‌کند^[۶].

روش تمام پژوهشگران برای بررسی تأثیر شکل‌بندی مهاربندها در قاب‌های فولادی دو بعدی، جزء روش‌های تحلیل ارتجاعی مرتبه‌ی دوم بوده است و برای سازه‌های با درجات نامعینی بالا چندان دقیق نیست و هیچ‌کدام از پژوهشگران برای بررسی این اثر از روش‌های تحلیل پیشرفته استفاده نکرده‌اند. هدف از این نوشتار، ارائه‌ی یک روش دقیق‌تر برای در نظر گرفتن تأثیر شکل‌بندی مهاربندها در قاب‌های فولادی دوبعدی است. برای این منظور، از یک روش پیشرفته ناحیه‌ی خمیری با استفاده از نرم‌افزار «ANSYS»^[۲] استفاده شده است.

۲. روش مورد مطالعه

روش مورد مطالعه، یک روش تحلیل غیرارتجاعی مرتبه‌ی دوم ناحیه‌ی خمیری است و براساس روش اجزای محدود اصلاح شده برای تحلیل سیستم سازه به کار می‌رود. به منزله‌ی یک مقایسه، مدل مفصل ارتجاعی - خمیری به ساده‌ترین تحلیل اشاره دارد، در حالی که مدل ناحیه‌ی ارتجاعی - خمیری بیشترین اصلاحات را نشان می‌دهد.

روش تحلیل ناحیه‌ی خمیری، گسترش خمیری شدن در حجم سازه را مستقیماً و صریح مدل‌سازی می‌کند. این شیوه در حالت کلی به دو گونه انجام می‌پذیرد: ۱. شبکه‌بندی با اجزای محدود؛ ۲. شبکه‌بندی بر پایه‌ی نگره‌ی تیر - ستون. در تحلیل با اجزای محدود، معمولاً از جزء پوسته‌ی فضا استفاده می‌شود. این شیوه می‌تواند مقاومت قاب‌ها را در حد نهایی پیش‌بینی کند و نمودار بار - تغییرمکان را به دقت رسم کند. اثرهایی مانند کمانش جانبی و موضعی، نقص‌های هندسی، تنش‌های پسماند، جاری شدن تدریجی سطح مقطع، گسترش خمیری شدن در طول عضوها، ترکیب تنش‌های محوری و برشی، ناپایداری‌های غیرخطی، رفتار اتصال و اندرکنش سازه با پی و خاک زیر آن را می‌توان به دقت مدل‌سازی کرد. در این شیوه، ماتریس سختی، مقاومت مقطع و مقاومت عضو با تابع انتگرال‌گیری عددی به دست می‌آید. پژوهشگران زیادی ثابت کرده‌اند که این روش توانایی رسیدن به پاسخ دقیق سازه را دارد^[۷].

در روش تیر - ستونی، هر عضو به چند جزء تیر - ستون و سطح مقطع آن به چند جزء رشته‌ی تقسیم می‌شود. شکل ۲، نمونه‌ی از این الگو را نشان می‌دهد. در این راهکار فرض می‌شود هنگامی که تنش در مرکز جزء به مقاومت تک محوری می‌رسد، جزء جاری شده است. تنش در هر رشته و تغییرمکان در هر گره، با انتگرال‌گیری عددی به دست می‌آید. همچنین، تنش پسماند در هر رشته را مقداری ثابت فرض می‌کنند، زیرا رشته‌ها به مقدار کافی کوچک هستند.

معمولاً در تحلیل ناحیه‌ی خمیری قاب‌های فولادی از الگوی تنش - کرنش

۱.۳. فرضیات

اعضای قاب‌ها از لحاظ جانبی کاملاً مهاربندی شده‌اند و به ظرفیت خمیری کامل خود می‌رسند. ضمناً تمام اتصالات صلب فرض شده‌اند. جزء انتخابی در نرم‌افزار «ANSYS»، «BEAM189» است. این جزء برای تحلیل سازه‌های تیر با ضخامت نازک مناسب است و براساس تئوری تیر تیموشنکو کار می‌کند و شامل تغییرشکل‌های برشی است. این جزء، یک جزء سه‌بعدی مکعبی است که ۶ یا ۷ درجه‌ی آزادی در هر گره دارد.^[۱] تمامی تیرها با ۲۰ جزء، ستون‌ها با ۵ جزء، و مهاربندها با ۲ جزء مدل شده‌اند. ضمناً تمام مقاطع به ۵ تار تقسیم شده‌اند. الگوی نمودار تنش - کرنش فولاد به صورت دو خطی و شیب قسمت دوم نمودار، صفر فرض شده است. بار ثقلی تیرها به صورت گسترده اعمال شده است. برای تعیین بار فروپاشی سازه، بارهای نموی در گام اول از طریق تقسیم بارهای کلی به یک ضریب ۱۰۰۰ تعیین می‌شوند و میزان افزایش بارها در هر گام به صورت خودکار در نرم‌افزار تعیین می‌شوند. جهت وارد کردن اثر نقص‌های هندسی اولیه، ستون‌ها به اندازه‌ی $\Psi = 1.5^\circ$ یا $\Psi = 1.45^\circ$ ارتفاع خود، مایل فرض شده‌اند. مقاطع اعضا ساخته شده از ورق با گوشه‌های تیز هستند.

۲.۳. حالت‌های بارگذاری

بارگذاری‌های مفروض به این شرح هستند:

- بارگذاری نوع A: بارگذاری اصلی
- بارگذاری نوع B:

(بارهای ثقلی بارگذاری نوع A) $3 \times A =$ بارهای ثقلی

(بارهای جانبی بارگذاری نوع A) $A =$ بارهای جانبی

- بارگذاری نوع C:

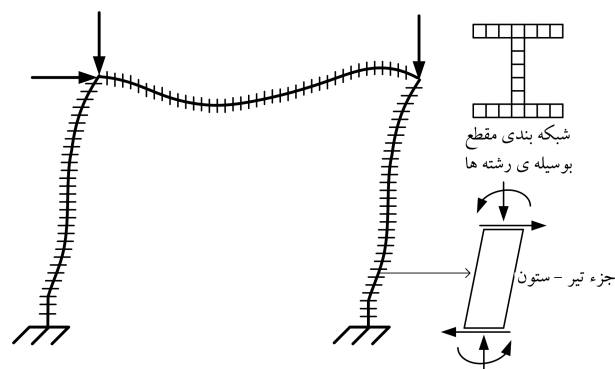
(بارهای ثقلی بارگذاری نوع A) $A =$ بارهای ثقلی

(بارهای جانبی بارگذاری نوع A) $3 \times A =$ بارهای جانبی

۳.۳. قاب خمشی ۶ طبقه‌ی «وگل»

«وگل» در سال ۱۹۸۵، قابی ۶ طبقه را به ۲ روش ناحیه‌ی خمیری و مفصل خمیری تحلیل کرد. هندسه، نوع مقاطع قاب و بارگذاری آن در نوع A در شکل ۳ آمده است. وی در تحلیل ناحیه‌ی خمیری، ستون‌ها را با یک جزء و تیرها را با ۸ جزء الگوسازی کرد. نقص مایل بودن اولیه‌ی ستون‌ها را بر پایه‌ی ضابطه‌ی آیین‌نامه‌ی ECCS، $\Psi = 1.45^\circ$ طول آنها فرض کرد. او ضریب بار نهایی را در تحلیل ناحیه‌ی خمیری و مفصل خمیری، به ترتیب ۱/۱۱ و ۱/۱۲۰ به دست آورد. تنش تسلیم فولاد ۲۳۵MPa و مدول ارتجاعی آن ۲۰۵GPa است.^[۱۱]

در پژوهشی در سال ۲۰۰۴، شیوه‌ی مفصل خمیری به کار رفت و ضریب بار با بهره‌گیری از دو جزء در تیرها ۱/۰۹۰، با استفاده از ۴ جزء در تیرها ۱/۰۸۸ و با روش پیشنهادی پژوهشگر ۱/۱۳۱ برآورد شد.^[۱۲] با استفاده از مقاطع BOX، قاب ۶ طبقه‌ی «وگل» را به حالت سیستم دوگانه‌ی خمشی - مهاربندی شده تبدیل می‌کنیم. برای طبقه‌های اول و دوم از $120 \times 6/5$ BOX، سوم و چهارم از $100 \times 6/7$ BOX و پنجم و ششم از $80 \times 5/5$ BOX استفاده می‌کنیم. شکل ۴، مدل‌سازی، مش‌بندی



شکل ۲. مدل‌سازی قاب در روش تحلیل ناحیه‌ی خمیری.

ارتجاعی - خمیری، بدون اثر کرنش سختی، استفاده می‌کنند. رابطه‌ی حاکم بر رفتار سازه در تحلیل ناحیه‌ی خمیری را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۱ فرض کرد:^[۹]

$$\{\dot{Q}\} = [[k_P] + [k_G] + [k_0]] \{\dot{u}\} \quad (1)$$

در این رابطه، $\{\dot{Q}\}$ و $\{\dot{u}\}$ به ترتیب بردار نموی نیرو و تغییرمکان هستند، $[k_0]$ ماتریس سختی تغییرمکان‌های بزرگ و $[k_G]$ ماتریس سختی هندسی نام دارد. اثر تغییرمکان‌های بزرگ در $[k_0]$ و اثر نیروی محوری در $[k_G]$ وارد می‌شود. $[k_P]$ ماتریس سختی ارتجاعی - خمیری همراه با اثر جاری شدن مواد است. درایه‌های $[k_P]$ در هر گام تحلیل از جمع برداری سختی مماسی بخش ارتجاعی در دسترس قرار می‌گیرد. همچنین، در پایان هر گام، نیروهای نامیزان با فرآیندی تکراری بخش می‌شوند.^[۱۰]

۳. مثال‌های عددی و معرفی معیارهای پیشنهادی در

رفتار سازه

جهت بررسی تأثیر نحوه‌ی قرارگیری مهاربندها در قاب‌های فولادی دوبعدی در رفتار این قاب‌ها، سه قاب خمشی فولادی ۶ طبقه‌ی «وگل»^[۱۱]، ۱۰ طبقه و ۲۰ طبقه هر کدام با ۸ آرایش مهاربند و هر آرایش با ۳ نوع بارگذاری مختلف با استفاده از یک تحلیل غیرارتجاعی مرتبه‌ی دوم که در برگزیده‌ی تمام عوامل ذکر شده در بخش مقدمه است، با نرم‌افزار «ANSYS»^[۱] تحلیل و نمودار نیرو - تغییرمکان جانبی هر حالت رسم شد. با رگرسیون‌گیری خطی از این نمودارها، سختی هر حالت را می‌توان محاسبه کرد. این سختی یک سختی پیشنهادی است که همان شیب معادله‌ی رگرسیون است. سختی پیشنهادی، میانگینی از سختی سازه در حالت خطی و غیرخطی است و تفاوت آن با سختی معمول که با آن آشنا هستیم، در آن است که اثرهای غیرخطی نیز در این سختی ملحوظ شده است. علاوه بر این کاربرد، هر چه مقدار این سختی بیشتر باشد، نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که مقدار بیشینه‌ی نیروی قابل تحمل سازه به تغییرمکان نهایی سازه، عدد بزرگ‌تری است.

میزان خطای بین نمودار نیرو - تغییرمکان سازه و معادله‌ی رگرسیون خطی (R^2) را نیز می‌توان تعیین کرد. این عدد یک مقدار بین ۰ و ۱ است. هرچه مقدار این عدد کوچک‌تر باشد، خطای رگرسیون‌گیری خطی بزرگ‌تر است. همچنین نشان می‌دهد که نمودار نیرو - تغییرمکان سازه حالت غیرخطی بیشتری دارد، در نتیجه، مفصل خمیری به تدریج و در اعضای کم‌اهمیت‌تر در سازه تشکیل می‌شوند و با افزایش بار، ناپایداری سازه به صورت ناگهانی نیست.

و شکل‌بندی‌های مختلف مهاربندهای قاب «وگل» را در نرم افزار ANSYS نشان می‌دهند.

پس از انجام تحلیل غیرارتجاعی مرتبه‌ی دوم، نمودار نیرو - تغییرمکان هر حالت را می‌توان رسم کرد، این نمودارها در شکل‌های ۵ الی ۷ نشان داده شده‌اند.

با استفاده از خروجی‌های نرم‌افزار مقادیر ضریب مقاومت نهایی و تغییرمکان جانبی نهایی سازه به دست می‌آید. این مقادیر در جدول ۱ آورده شده‌اند. با توجه به جدول ۱ و شکل‌های ۵ الی ۷، این نتایج حاصل می‌شود:

۱. اضافه‌کردن مهاربند با ترتیب و نوع مذکور در قاب ۶ طبقه باعث افزایش و یا کاهش سختی جانبی پیشنهادی می‌شود. این افزایش یا کاهش به طور میانگین در حالت‌های مختلف بارگذاری در شکل‌بندی نوع دو ۱۲/۶۹، شکل‌بندی نوع سه ۲۸/۰۱، شکل‌بندی نوع چهار ۱۶/۶۱، شکل‌بندی نوع پنج ۵/۷۸، شکل‌بندی نوع شش ۵/۸۴، شکل‌بندی نوع هفت ۱۰/۲۰ و شکل‌بندی نوع هشت ۷/۴۰ برابر نسبت به شکل‌بندی نوع یک است.

۲. اضافه‌کردن مهاربند با ترتیب و نوع مذکور در قاب ۶ طبقه باعث افزایش و یا کاهش ضریب مقاومت نهایی سازه می‌شود. این افزایش یا کاهش به طور میانگین در حالت‌های مختلف بارگذاری در شکل‌بندی نوع دو ۲۷٪، شکل‌بندی نوع سه ۲۴٪، شکل‌بندی نوع چهار ۳۲٪، شکل‌بندی نوع پنج ۴٪-، شکل‌بندی نوع شش ۴٪-، شکل‌بندی نوع هفت ۲۴٪ و شکل‌بندی نوع هشت ۴۷٪ نسبت به شکل‌بندی نوع یک است.

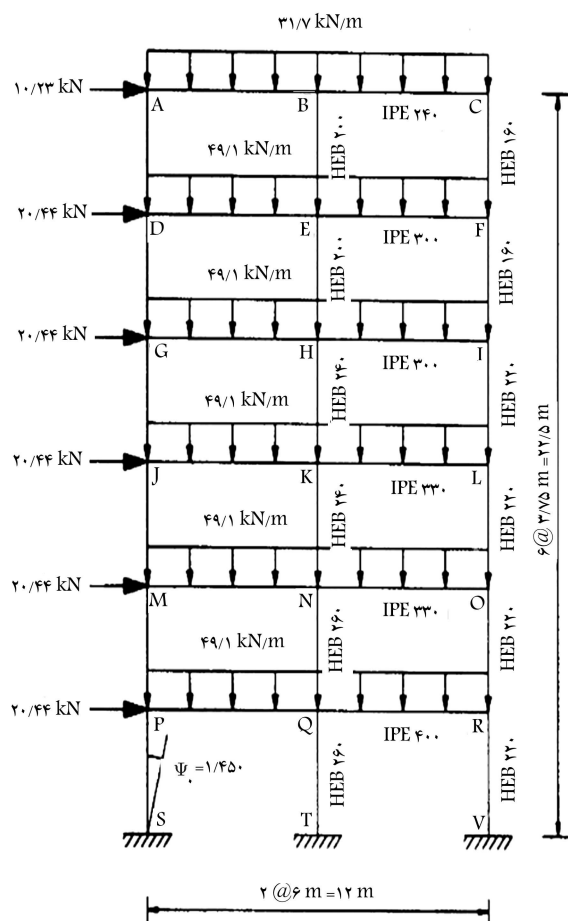
۳. اضافه‌کردن مهاربند با ترتیب و نوع مذکور در قاب ۶ طبقه باعث افزایش یا کاهش تغییرمکان جانبی نهایی سازه می‌شود. این افزایش یا کاهش به طور میانگین در حالت‌های مختلف بارگذاری در شکل‌بندی نوع دو ۸۹٪-، شکل‌بندی نوع سه ۹۵٪-، شکل‌بندی نوع چهار ۹۱٪-، شکل‌بندی نوع پنج ۱۹٪-، شکل‌بندی نوع شش ۹٪-، شکل‌بندی نوع هفت ۸۶٪- و شکل‌بندی نوع هشت ۷۷٪- نسبت به شکل‌بندی نوع یک است.

۴. با توجه به نمودارهای نیرو - تغییرمکان قاب ۶ طبقه، میانگین خطای رگرسیون‌گیری خطی (R^2) در بارگذاری‌های مختلف برای شکل‌بندی‌های نوع ۱ الی ۸ به ترتیب، ۸۳۹/۰، ۱۰۰۰/۰، ۹۷۷/۰، ۸۷۲/۰، ۹۰۵/۰، ۹۱۲/۰، ۹۹۵/۰ و ۹۸۳/۰ است.

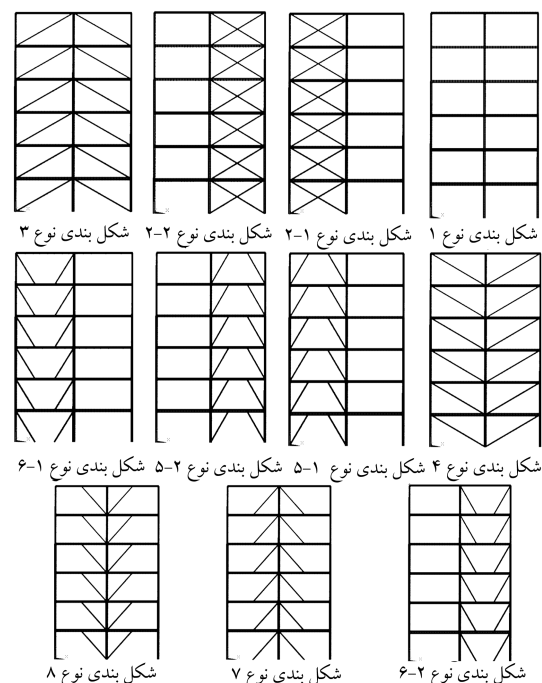
۴.۳. قاب ۱۰ طبقه‌ی سه‌دهانه

مشخصات ابعادی قاب ۱۰ طبقه‌ی سه دهانه، بارگذاری و نوع مقاطع اعضاء در شکل ۸ نشان داده شده است. تنش جاری‌شدن فولاد مصرفی 2400 kg/cm^2 و مدول ارتجاعی آن 10^6 kg/cm^2 است. نقص هندسی مایل‌بودن اولیه‌ی ستون‌ها به مقدار $\Psi = 1/500$ در نظر گرفته شده است. کلیه‌ی مقاطع ساخته‌شده از ورق با گوشه‌های تیز هستند.

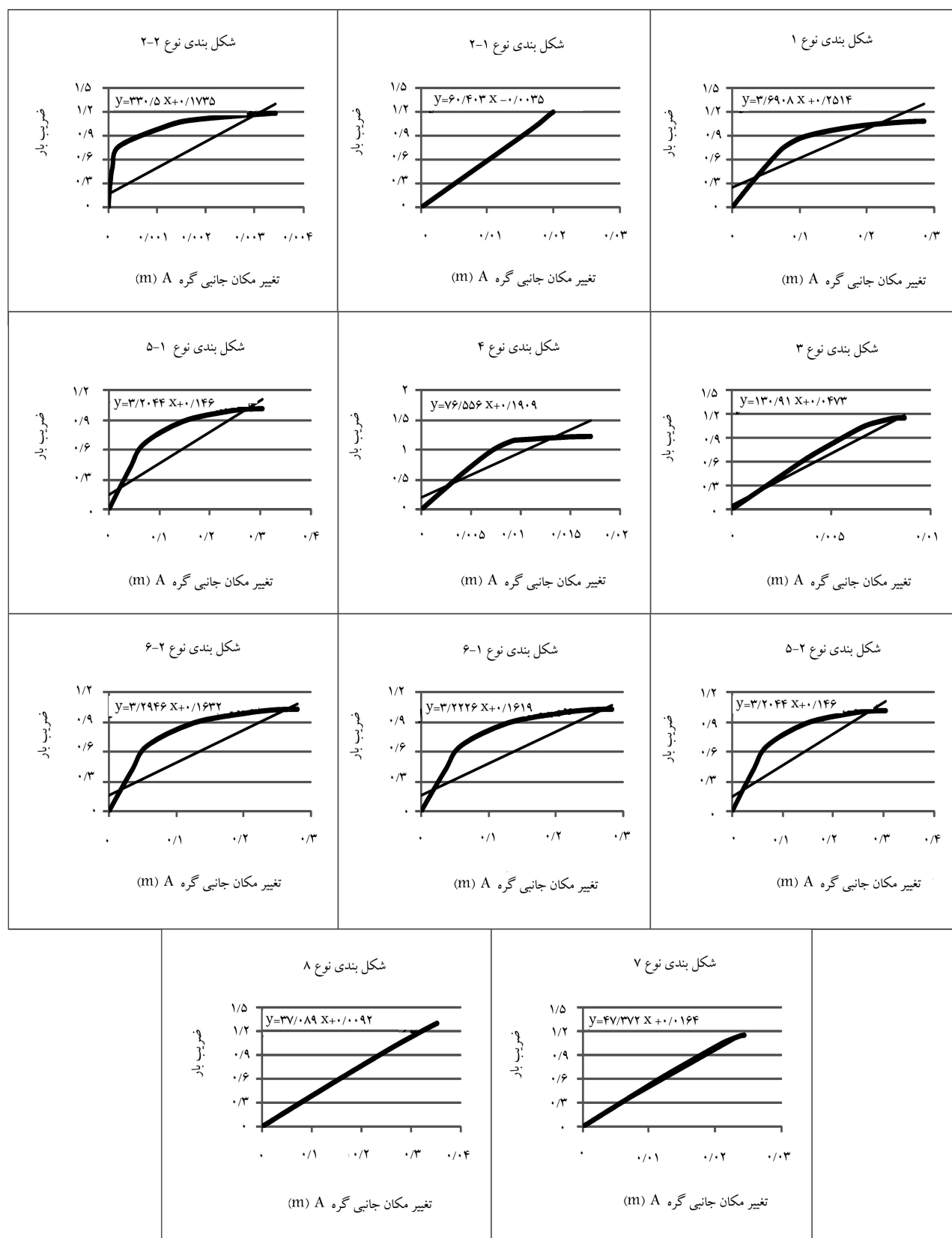
با استفاده از مقاطع BOX، قاب ۱۰ طبقه‌ی سه دهانه را به حالت سیستم دوگانه‌ی خمشی - مهاربندی‌شده تبدیل می‌کنیم. برای طبقه‌های اول و دوم از $BOX 120 \times 6/5$ ، سوم الی ششم از $BOX 100 \times 6/0$ و هفتم الی دهم از $BOX 80 \times 5/5$ استفاده می‌کنیم. شکل ۹، مدل‌سازی، مش‌بندی و شکل‌بندی‌های مختلف مهاربندهای قاب ۱۰ طبقه را در نرم‌افزار ANSYS نشان می‌دهد.



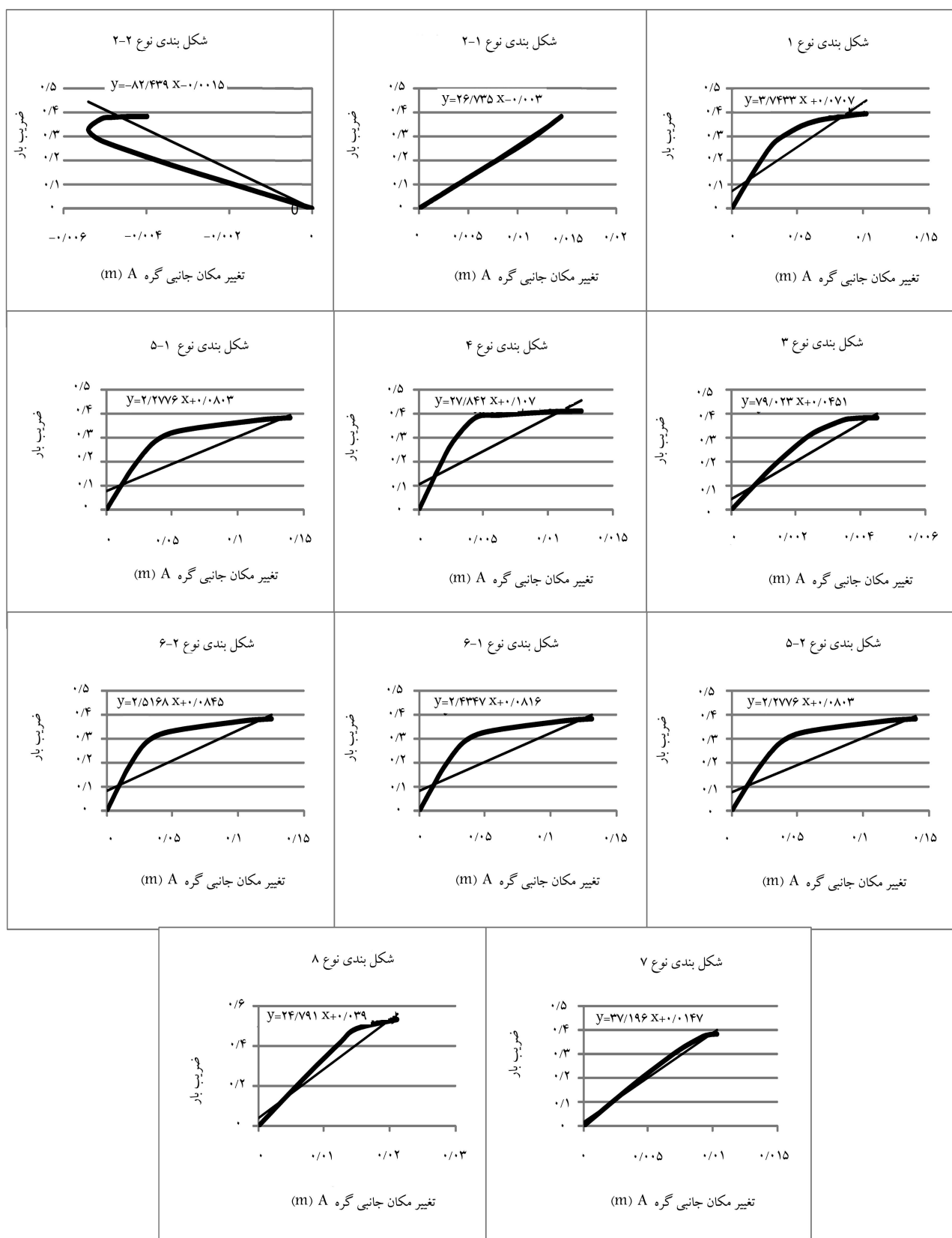
شکل ۳. مشخصات قاب ۶ طبقه‌ی «وگل» در بارگذاری نوع A. [۱۱]



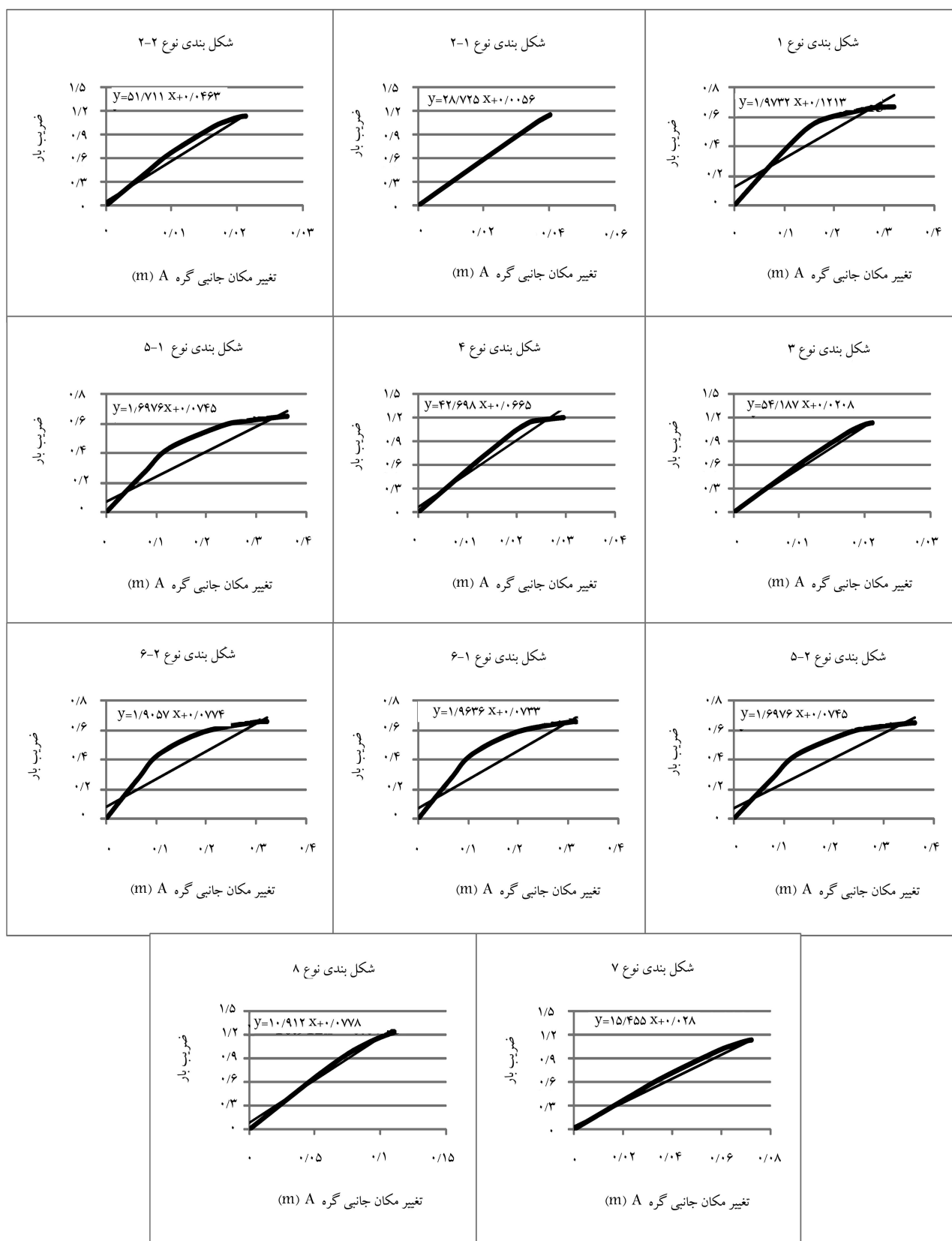
شکل ۴. مدل‌سازی، مش‌بندی و شکل‌بندی‌های مختلف مهاربندهای قاب «وگل» در نرم‌افزار ANSYS.



شکل ۵. نمودار نیرو - تغییر مکان قاب ۶ طبقه‌ی «وگل» در شکل بندی‌های مختلف - بارگذاری نوع A.



شکل ۶. نمودار نیرو - تغییر مکان قاب ۶ طبقه ی «وگل» در شکل بندی های مختلف - بارگذاری نوع B.



شکل ۷. نمودار نیرو - تغییر مکان قاب ۶ طبقه‌ای «وگل» در شکل بندی‌های مختلف - بارگذاری نوع C.

جدول ۱. ضرایب مقاومت نهایی، تغییر مکان نهایی و سختی پیشنهادی سه قاب مورد بررسی در شکل‌بندی و بارگذاری‌های مختلف.

سازه	ANSYS نتایج	نوع شکل‌بندی مهاربندهای محوری سازه																	
		۱		۲-۱۵۲		۲-۲		۳		۴		۵-۱۵۵		۵-۲		۶-۱۵۶		۶-۲	
		میانگین	حالات	میانگین	حالات	میانگین	حالات	میانگین	حالات	میانگین	حالات	میانگین	حالات	میانگین	حالات	میانگین	حالات	میانگین	حالات
قاب ده طبقه	تغییر مکان جانبی نهایی (mm)	A	۰/۵۵۴	۰/۵۸۶	۰/۱۳۰	*	۰/۹۲	۰/۱۱۳	۰/۱۶۶	۰/۱۴۵	۰/۵۵۴	۰/۵۶۱	۰/۴۲۶	۰/۵۶۱	۰/۴۲۶	۰/۴۲۶	۰/۴۲۶	۰/۴۲۶	۰/۴۲۶
		B	۰/۴۲۵	۰/۵۸۶	۰/۵۵۵	*	۰/۸۰	۰/۱۱۳	۰/۹۷	۰/۱۴۵	۰/۴۲۵	۰/۵۶۱	۰/۴۲۶	۰/۵۶۱	۰/۴۲۶	۰/۴۲۶	۰/۴۲۶	۰/۴۲۶	۰/۴۲۶
		C	۰/۷۷۹	۰/۵۸۶	۰/۲۰۱	*	۰/۱۶۷	۰/۱۱۳	۰/۱۷۱	۰/۱۷۱	۰/۷۰۳	۰/۵۶۱	۰/۷۰۳	۰/۷۰۳	۰/۷۰۳	۰/۷۰۳	۰/۷۰۳	۰/۷۰۳	۰/۷۰۳
	ضریب مقاومت نهایی	A	۰/۵۸۱	۰/۳۸۷	۱/۶۰۰	*	۰/۵۶۲	۰/۸۷۲	۱/۴۶۶	۰/۹۴۱	۰/۵۸۱	۰/۳۸۶	۰/۳۲۲	۰/۳۸۶	۰/۳۲۲	۰/۳۲۲	۰/۳۲۲	۰/۳۲۲	۰/۳۲۲
		B	۰/۳۲۲	۰/۳۸۷	۱/۰۵۶	*	۰/۵۶۲	۰/۸۷۲	۱/۴۶۶	۰/۹۴۱	۰/۳۲۲	۰/۳۸۶	۰/۳۲۲	۰/۳۸۶	۰/۳۲۲	۰/۳۲۲	۰/۳۲۲	۰/۳۲۲	۰/۳۲۲
		C	۰/۲۵۷	۰/۳۸۷	۰/۹۶۲	*	۰/۷۹۳	۰/۸۷۲	۰/۷۶۶	۰/۷۶۶	۰/۲۵۶	۰/۳۸۶	۰/۲۵۶	۰/۲۵۶	۰/۲۵۶	۰/۲۵۶	۰/۲۵۶	۰/۲۵۶	۰/۲۵۶
	سختی	A	۱/۰۴۰	۱/۲۱۰۶	۱/۲۱۰۶	*	۱۴/۵۲	۸/۸۷۶	۹/۷۷۱	۶/۶۴۲	۱/۰۴۱	۱/۲۱۰۶	۱/۲۱۰۶	۱/۲۱۰۶	۱/۲۱۰۶	۱/۲۱۰۶	۱/۲۱۰۶	۱/۲۱۰۶	۱/۲۱۰۶
		B	۱/۰۴۰	۱/۲۱۰۶	۱/۲۱۰۶	*	۱۴/۵۲	۸/۸۷۶	۹/۷۷۱	۶/۶۴۲	۱/۰۴۱	۱/۲۱۰۶	۱/۲۱۰۶	۱/۲۱۰۶	۱/۲۱۰۶	۱/۲۱۰۶	۱/۲۱۰۶	۱/۲۱۰۶	۱/۲۱۰۶
		C	۱/۰۴۱	۱/۲۱۰۶	۱/۲۱۰۶	*	۱۴/۵۲	۸/۸۷۶	۹/۷۷۱	۶/۶۴۲	۱/۰۴۱	۱/۲۱۰۶	۱/۲۱۰۶	۱/۲۱۰۶	۱/۲۱۰۶	۱/۲۱۰۶	۱/۲۱۰۶	۱/۲۱۰۶	۱/۲۱۰۶
	R _y	A	۰/۹۱۸	۰/۹۹۰	۰/۹۹۰	*	۰/۹۱۸	۰/۹۹۰	۰/۹۱۸	۰/۹۱۸	۰/۹۱۸	۰/۹۱۸	۰/۹۱۸	۰/۹۱۸	۰/۹۱۸	۰/۹۱۸	۰/۹۱۸	۰/۹۱۸	۰/۹۱۸
		B	۰/۹۱۷	۰/۹۹۰	۰/۹۹۰	*	۰/۹۱۷	۰/۹۹۰	۰/۹۱۷	۰/۹۱۷	۰/۹۱۷	۰/۹۱۷	۰/۹۱۷	۰/۹۱۷	۰/۹۱۷	۰/۹۱۷	۰/۹۱۷	۰/۹۱۷	۰/۹۱۷
		C	۰/۸۹۳	۰/۹۹۰	۰/۹۹۰	*	۰/۸۹۳	۰/۹۹۰	۰/۸۹۳	۰/۸۹۳	۰/۸۹۳	۰/۸۹۳	۰/۸۹۳	۰/۸۹۳	۰/۸۹۳	۰/۸۹۳	۰/۸۹۳	۰/۸۹۳	۰/۸۹۳
قاب شش طبقه و گل	تغییر مکان جانبی نهایی (mm)	A	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵
		B	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵
		C	۰/۳۱۹	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵
	ضریب مقاومت نهایی	A	۱/۰۹۷	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵
		B	۱/۰۹۷	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵
		C	۱/۰۹۷	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵	۱/۲۸۵
	سختی	A	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱
		B	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱
		C	۱/۹۷۳	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۱/۹۷۳	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱	۲/۶۹۱
	R _y	A	۰/۷۷۹	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
		B	۰/۸۴۹	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
		C	۰/۸۸۸	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
قاب بیست طبقه	تغییر مکان جانبی نهایی (mm)	A	۰/۷۵۷	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲
		B	۰/۳۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲
		C	۰/۷۵۷	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲	۰/۴۲۲
	ضریب مقاومت نهایی	A	۱/۰۱	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹
		B	۰/۴۵۸	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹
		C	۰/۴۹۱	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹	۱/۲۸۹
	سختی	A	۱/۴۹۹	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷
		B	۱/۴۹۹	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷
		C	۰/۵۵۲	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۰/۵۵۲	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷	۲/۳۱۷
	R _y	A	۰/۹۸۶	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳
		B	۰/۹۹۶	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳
		C	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳

در حالت‌های مختلف بارگذاری در شکل‌بندی نوع دو ۱۷۹٪، شکل‌بندی نوع سه ۱۳۳٪، شکل‌بندی نوع چهار ۱۴۶٪، شکل‌بندی نوع پنج ۰٪، شکل‌بندی نوع شش ۰٪، شکل‌بندی نوع هفت ۱۴۵٪ و شکل‌بندی نوع هشت ۱۳۸٪ نسبت به شکل‌بندی نوع یک است.

۳. اضافه‌کردن مهاربند با ترتیب و نوع ذکرشده در متن نوشتار در قاب ۱۰ طبقه باعث کاهش تغییر مکان جانبی نهایی سازه می‌شود. این کاهش به طور میانگین در حالت‌های مختلف بارگذاری در شکل‌بندی نوع دو ۷۹٪، شکل‌بندی نوع سه ۸۱٪، شکل‌بندی نوع چهار ۷۵٪، شکل‌بندی نوع پنج ۳٪، شکل‌بندی نوع

۱. اضافه‌کردن مهاربند با ترتیب و نوع مذکور در قاب ۱۰ طبقه باعث افزایش سختی جانبی پیشنهادی می‌شود. این افزایش به طور میانگین در حالت‌های مختلف بارگذاری در شکل‌بندی نوع دو ۱۳۷۶٪، شکل‌بندی نوع سه ۱۳۰۵٪، شکل‌بندی نوع چهار ۱۰۴۰٪، شکل‌بندی نوع پنج ۱۰۰۷٪، شکل‌بندی نوع شش ۱۲۹٪، شکل‌بندی نوع هفت ۱۳۹۷٪ و شکل‌بندی نوع هشت ۱۱۰۲٪ برابر نسبت به شکل‌بندی نوع یک است.

۲. اضافه‌کردن مهاربند با ترتیب و نوع ذکرشده در متن نوشتار در قاب ۱۰ طبقه باعث افزایش ضریب مقاومت نهایی سازه می‌شود. این افزایش به طور میانگین

شش ۳٪، شکل بندی نوع هفت ۱۸٪ و شکل بندی نوع هشت ۲۲٪ نسبت به شکل بندی نوع یک است.

۴. با توجه به نمودارهای نیرو - تغییرمکان قاب ۱۰ طبقه (شکل های ۱۰ الی ۱۲)، میانگین خطای رگرسیون گیری خطی (R^2) در بارگذاری های مختلف برای شکل بندی های نوع ۱ الی ۸ به ترتیب ۰/۹۰۹، ۰/۹۹۲، ۰/۹۶۹، ۰/۹۵۴، ۰/۹۱۱، ۰/۹۳۵، ۰/۹۹۴ و ۰/۹۹۴ است.

۵.۳. قاب ۲۰ طبقه سه دهانه

مشخصات ابعادی قاب ۲۰ طبقه سه دهانه، بارگذاری و نوع مقاطع اعضا در شکل ۱۳ نشان داده شده است. تنش جاری شدن فولاد مصرفی 240 kg/cm^2 و مدول ارتجاعی آن 10^6 kg/cm^2 است. نقص هندسی مایل بودن اولیه ستون ها به مقدار $\Psi = 1/500$ در نظر گرفته شده است. کلیه مقاطع ساخته شده از ورق با گوشه های تیز هستند.

با استفاده از مقاطع BOX، قاب ۲۰ طبقه را به حالت سیستم دوگانه خمشی - مهاربندی شده تبدیل می کنیم. برای طبقه های اول تا هفتم از BOX $120 \times 6/5$ ، هشتم تا چهاردهم از BOX $100 \times 6/1$ و پانزدهم تا بیستم از BOX $80 \times 5/5$ استفاده می کنیم. شکل بندی های مهاربندها در قاب ۲۰ طبقه مانند قاب ۱۰ طبقه هستند (شکل ۹).

پس از انجام تحلیل غیرارتجاعی مرتبه دوم، نمودار نیرو - تغییرمکان هر حالت را می توان رسم کرد، این نمودارها در شکل های ۱۴ الی ۱۶ نشان داده شده اند. همچنین با استفاده از خروجی های نرم افزار مقادیر ضریب مقاومت نهایی و تغییرمکان جانبی نهایی سازه به دست می آید. این مقادیر در جدول ۱ آورده شده اند.

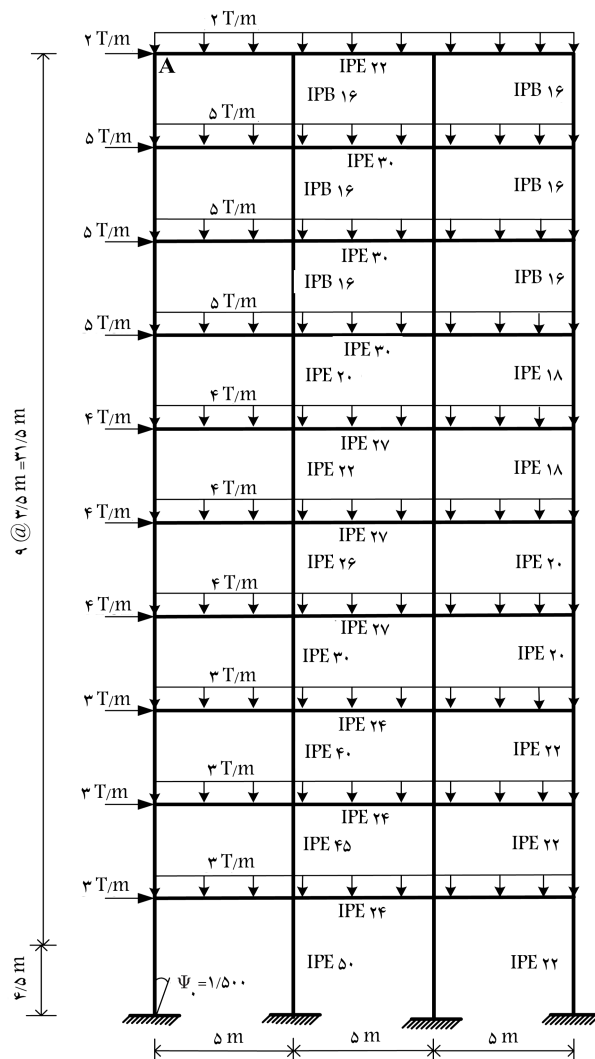
با توجه به جدول ۱ و شکل های ۱۴ الی ۱۶ این نتایج حاصل می شود:

۱. اضافه کردن مهاربند با ترتیب و نوع مذکور در قاب ۲۰ طبقه باعث افزایش و یا کاهش سختی جانبی پیشنهادی می شود. این افزایش یا کاهش به طور میانگین در حالت های مختلف بارگذاری در شکل بندی نوع دو ۱/۹۵، شکل بندی نوع سه ۲/۷۸، شکل بندی نوع چهار ۲/۶۳، شکل بندی نوع پنج ۰/۹۵، شکل بندی نوع شش ۰/۹۷، شکل بندی نوع هفت ۱/۹۷ و شکل بندی نوع هشت ۱/۷۸ برابر نسبت به شکل بندی نوع یک است.

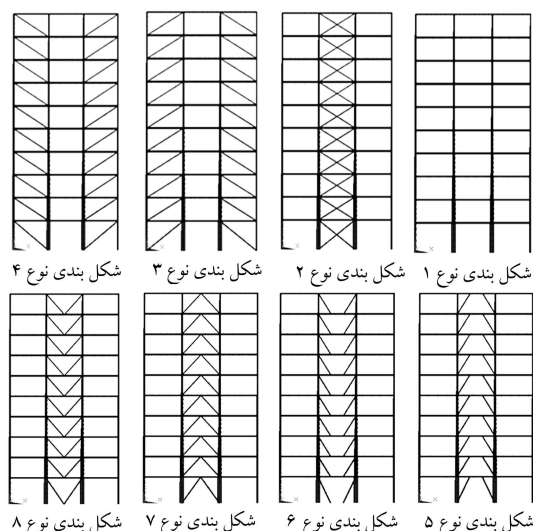
۲. اضافه کردن مهاربند با ترتیب و نوع مذکور در قاب ۲۰ طبقه باعث افزایش ضریب مقاومت نهایی سازه می شود. این افزایش به طور میانگین در حالت های مختلف بارگذاری در شکل بندی نوع دو ۳۱٪، شکل بندی نوع سه ۴۸٪، شکل بندی نوع چهار ۴۸٪، شکل بندی نوع پنج ۲٪، شکل بندی نوع شش ۱٪، شکل بندی نوع هفت ۳۲٪ و شکل بندی نوع هشت ۳۱٪ نسبت به شکل بندی نوع یک است.

۳. اضافه کردن مهاربند با ترتیب و نوع مذکور در قاب ۲۰ طبقه باعث افزایش کاهش تغییرمکان جانبی نهایی سازه می شود. این افزایش یا کاهش به طور میانگین در حالت های مختلف بارگذاری در شکل بندی نوع دو ۳۵٪-، شکل بندی نوع سه ۴۸٪-، شکل بندی نوع چهار ۵۶٪-، شکل بندی نوع پنج ۴٪، شکل بندی نوع شش ۲٪، شکل بندی نوع هفت ۳۶٪- و شکل بندی نوع هشت ۲۷٪- نسبت به شکل بندی نوع یک است.

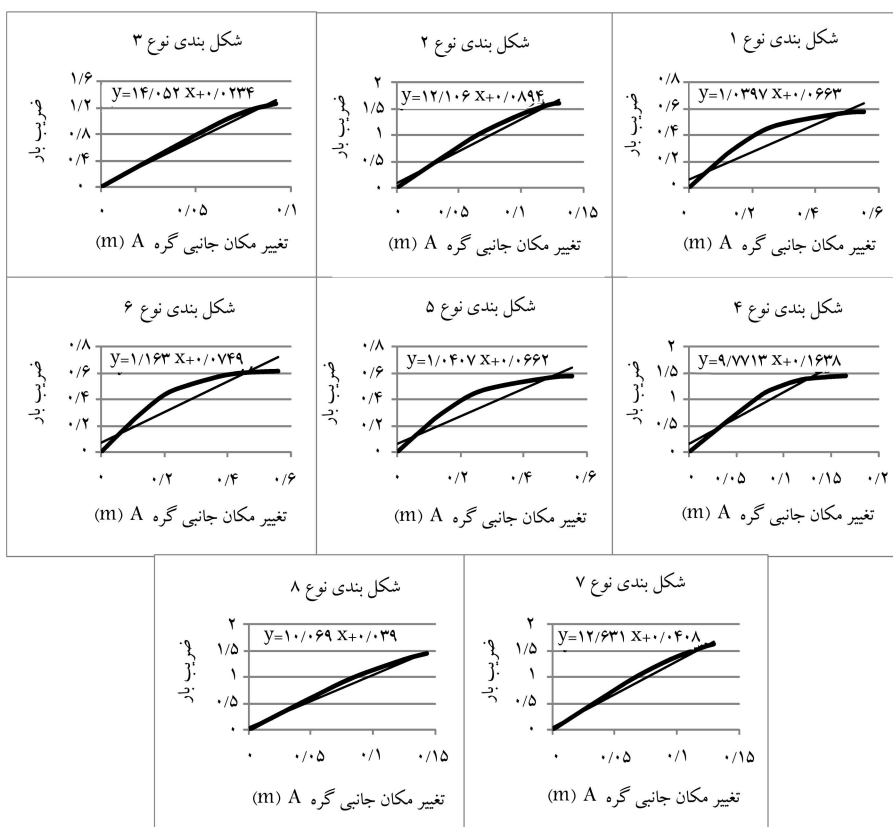
۴. با توجه به نمودارهای نیرو - تغییرمکان قاب ۲۰ طبقه، میانگین خطای رگرسیون گیری خطی (R^2) در بارگذاری های مختلف برای شکل بندی های نوع ۱ الی ۸ به ترتیب



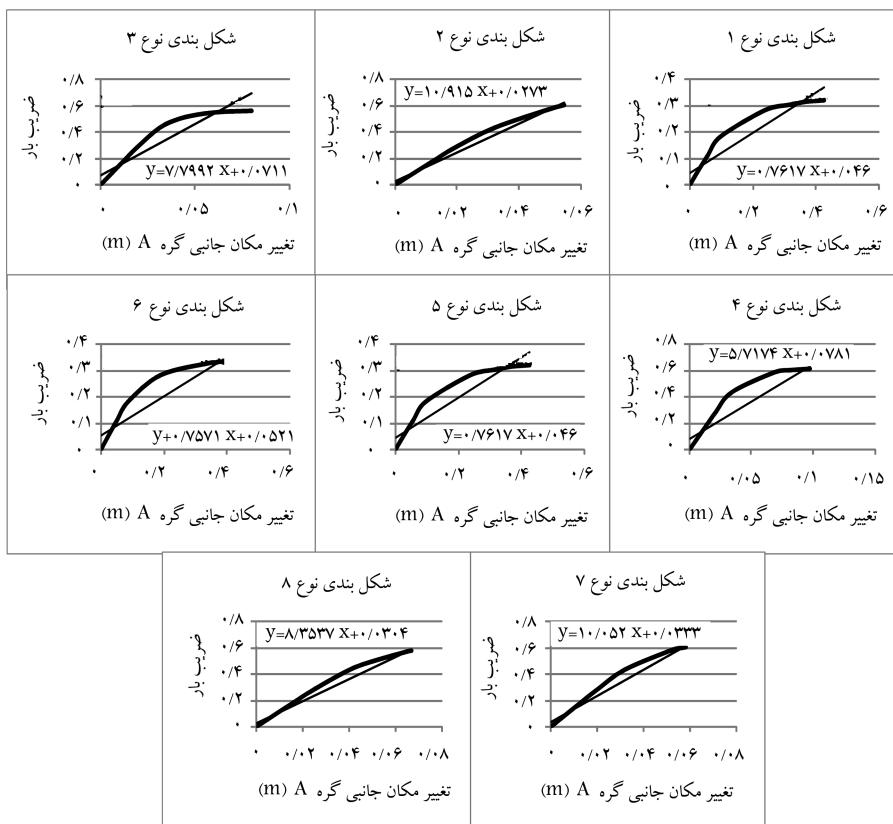
شکل ۸. مشخصات قاب ۱۰ طبقه سه دهانه فولادی در بارگذاری نوع A.



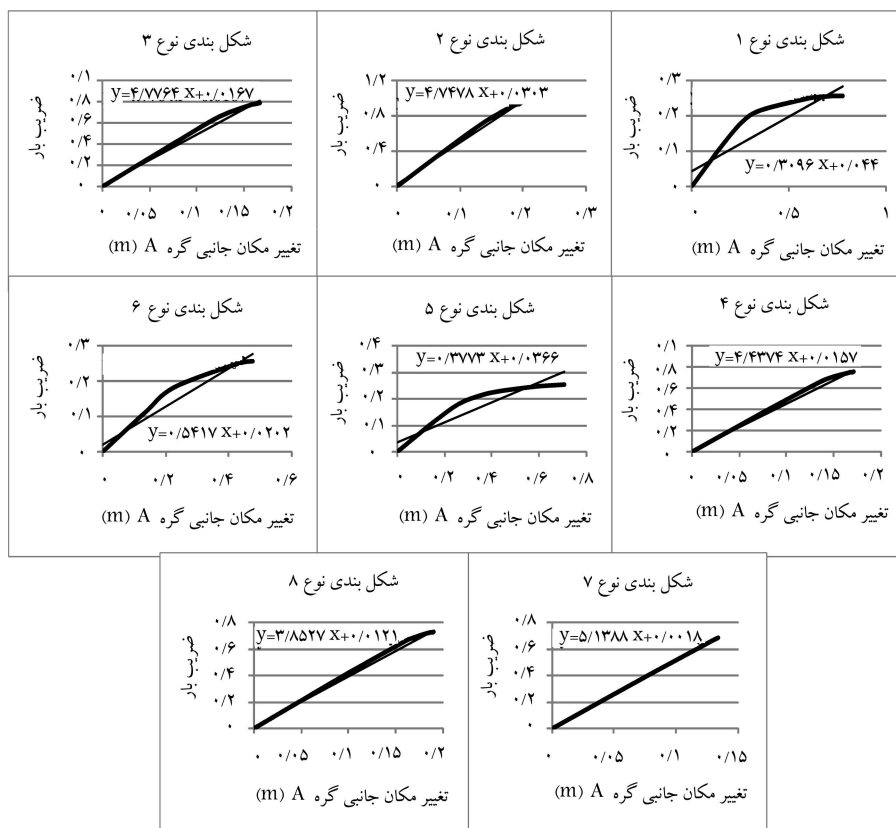
شکل ۹. مدل سازی، مش بندی و شکل بندی های مختلف مهاربند های قاب ۱۰ طبقه سه دهانه در نرم افزار ANSYS.



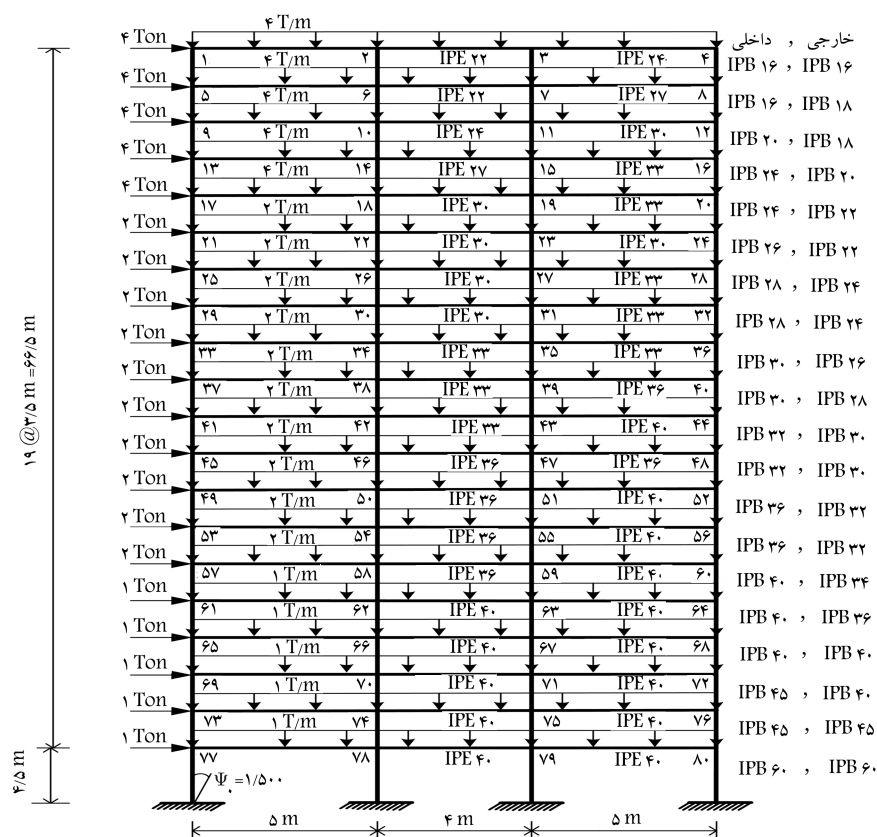
شکل ۱۰. نمودار نیرو - تغییر مکان قاب ۱۰ طبقه‌ی سه دهانه در شکل‌بندی‌های مختلف - بارگذاری نوع A.



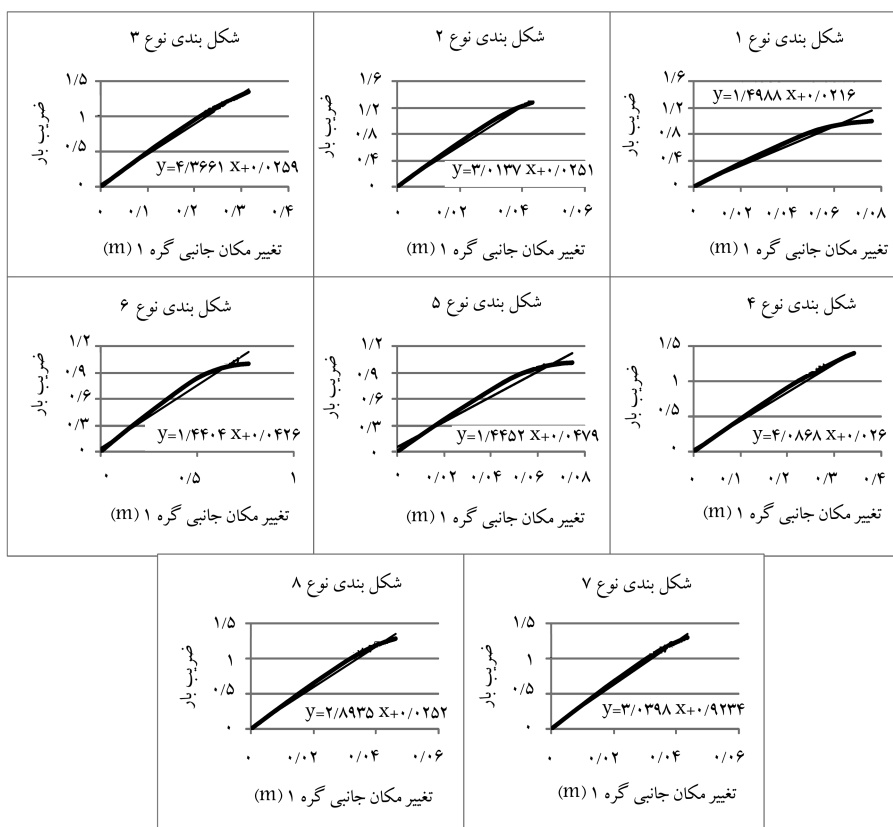
شکل ۱۱. نمودار نیرو - تغییر مکان قاب ۱۰ طبقه‌ی سه دهانه در شکل‌بندی‌های مختلف - بارگذاری نوع B.



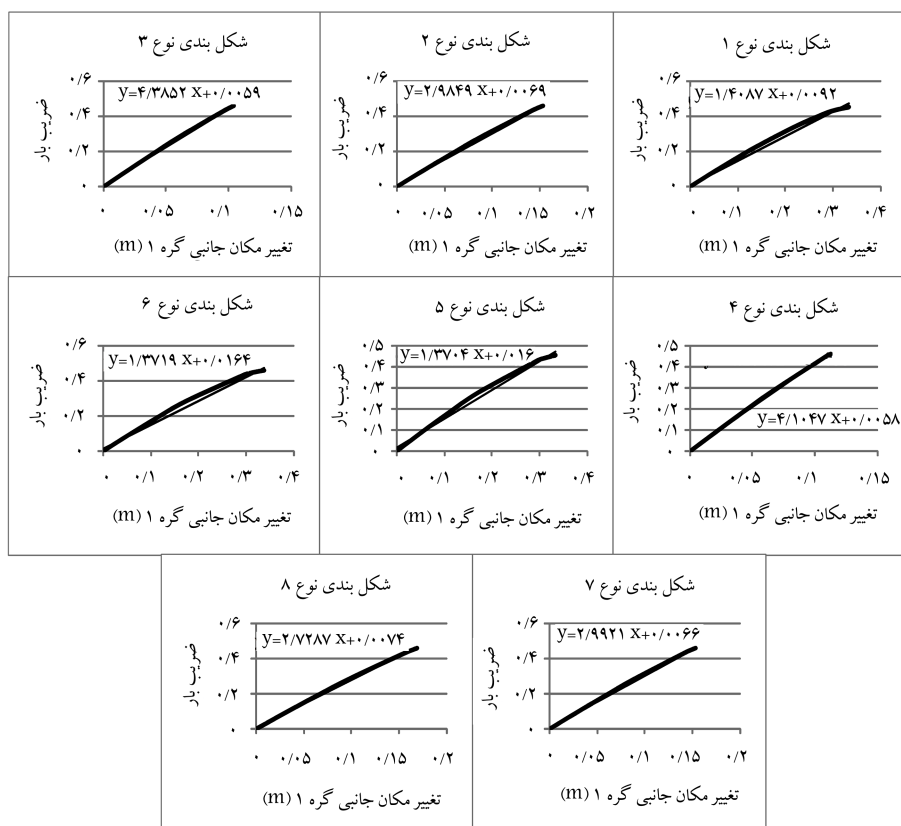
شکل ۱۲. نمودار نیرو - تغییر مکان قاب ۱۰ طبقه‌ی سه دهانه در شکل‌بندی‌های مختلف - بارگذاری نوع C.



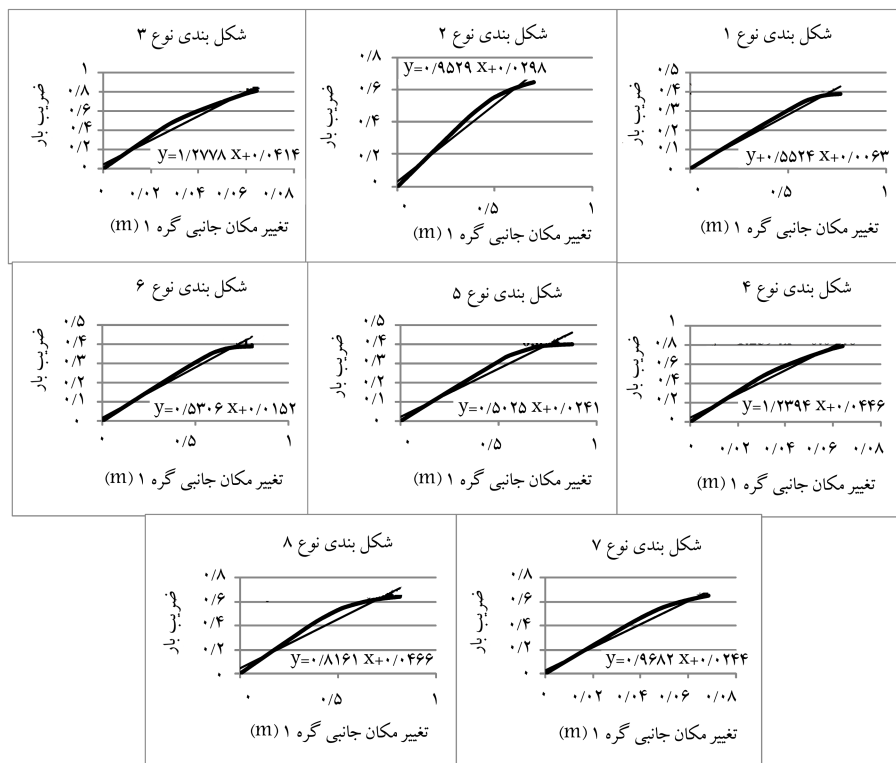
شکل ۱۳. مشخصات قاب ۲۰ طبقه‌ی سه دهانه فولادی در بارگذاری نوع A.



شکل ۱۴. نمودار نیرو - تغییر مکان قاب ۲۰ طبقه‌ی سه دهانه در شکل‌بندی‌های مختلف - بارگذاری نوع A.



شکل ۱۵. نمودار نیرو - تغییر مکان قاب ۲۰ طبقه‌ی سه دهانه در شکل‌بندی‌های مختلف - بارگذاری نوع B.



شکل ۱۶. نمودار نیرو - تغییر مکان قاب ۲۰ طبقه‌ای سه دهانه در شکل‌بندی‌های مختلف - بارگذاری نوع C.

ترتیب ۱۴/۶۱ و ۹/۸۸ برابر) و شکل‌بندی‌های نوع ۵ و ۶ (بادبندهای واگرا) دارای کمترین افزایش سختی پیشنهادی (به ترتیب ۰/۹۳ و ۱/۰۳ برابر) نسبت به حالت بدون مهاربند هستند.

۳. در سه قاب مورد بررسی، به طور میانگین، شکل‌بندی نوع ۲ (بادبندهای X شکل) دارای بیشترین افزایش ضریب مقاومت نهایی (۷۹٪) و شکل‌بندی‌های نوع ۵ و ۶ (بادبندهای واگرا) دارای کاهش ضریب مقاومت نهایی (۱٪) نسبت به حالت بدون مهاربند هستند.

۴. در سه قاب مورد بررسی، شکل‌بندی‌های نوع ۱ (بدون بادبند) و نوع ۵ (بادبند واگرا - هشتی) جزء شکل‌بندی‌های دارای کمترین مقدار (R^2) و یا بیشترین مقدار رفتار غیرخطی هستند.

۰/۹۹۲، ۰/۹۹۳، ۰/۹۹۳، ۰/۹۹۴، ۰/۹۸۱، ۰/۹۸۶، ۰/۹۹۵ و ۰/۹۸۷ است.

۴. نتیجه‌گیری

۱. روش مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار ANSYS، ضریب بار نهایی قاب «وگل» را با خطای بیشینه ۳/۰٪ نسبت به روش‌های تحلیل ناحیه‌ی خمیری «وگل»^[۱۱] و تحلیل مفصل خمیری «کیم و همکاران»^[۱۲] برآورد می‌کند.
۲. در سه قاب مورد بررسی، به طور میانگین، شکل‌بندی‌های نوع ۳ و ۴ (بادبندهای X شکل در دهانه‌های کناری) دارای بیشترین افزایش سختی پیشنهادی (به

منابع (References)

1. AISC, *Load and Resistance Factor Design*, Manual of Steel Construction, 3rd ed., American Institute of Steel Construction, Chicago, IL (2001).
2. ANSYS/Online Manual, version 5.5, ANSYS (2000).
3. ABAQUS/Standard User's Manual, version 5.8, vol I. Pawtucket (RI): Hibbit, Karlsson and Sorensen (1998).

4. Chen, W.F. and Kim, S.E., *LRFD Steel Design Using Advanced Analysis*, CRC Press, New York (1997).
5. ECCS "Essentials of eurocode 3: Design manual for steel structures in buildings", *ECCS-Advisory Committee*, 5(65), p. 60 (1991).
6. Liew, J.Y.R. "Advanced analysis for frame design", PhD dissertation, School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN (1992).
7. King, W.S., White, D.W. and Chen, W.F. "Second-

- order inelastic analysis for steel frame design", *Journal of structural Engineering, ASCE*, **118**(2), pp. 408-428 (1992).
8. Liew, J. Y.R., White, D.W. and Chen, W.F. "Second-order refined plastic hinge analysis for frame design: Part 1", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **119**, pp. 3196-3216 (1993).
9. Chan, S.L. "Review: Nonlinear behavior and design of steel structures", *Journal of Constructional Steel Research*, **57**, pp. 1217-1231 (2001).
10. Ziemain, R.D. "Examples of frame studies used to verify advanced methods of inelastic analysis. In: Plastic hinge based methods for advanced analysis and design of steel frames – an assessment of the-state-of-the-art", White, D.W. and Chen, W.F., Eds., Structural Stability Research Council, SSRC, Lehigh University, Bethlehem, PA (1993).
11. Vogel, U. "Calibrating frames", *Stahlbau*, **10**, pp. 1-7 (1985).
12. Seung-Eock, K. and Se-Hyu, C. "Practical second-order inelastic analysis for three-dimensional steel frames subjected to distributed load", *Thin-Walled Structures*, ELSEVIER (2005).