مطالعه تحلیلی رفتار هیسترزیس ستونهای با قید افقی تحت بارهای رفت و برگشتی

بهرخ حسینی‌هاشمی، استادیار پژوهشکده مهندسی سازه پژوهشگاه/ الله‌رضا مرادی‌گروسی، عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی‌واحد سنندج

۱ـ چکیده

در اکثر ساختمانهای اسکلت فولادی در ایران به دلیل عدم وجود ستونهای با مقاطع مناسب، از ستونهای با قید افقی استفاده می‌شود؛ لیکن در آیین‌نامه‌ها برای طراحی لرزه‌ای آنها اطلاعات کافی درباره رفتار این نوع مقاطع وجود ندارد. در این تحقیق با استفاده از تحلیلهای استاتیکی غیرخطی، رفتار غیرخطی این نوع ستونها بررسی شده‌است. بدین منظور با استفاده از برنامه ANSYS، رفتار کمانشی و هیسترزیس این نوع ستونها با توجه به تأثیر فاصله قیدها و ضخامت آنها در فواصل ۳۰، ۴۰ و ۵۰ و ضخامتهای ۰/۸، ۱ و ۱/۲ سانتیمتر تحلیل شده‌است. علاوه‌برآن، تأثیر فاصله قیدها به همراه اثر اجرای نادرست این قیدها در عملکرد زلزله‌های گذشته با حالت تحلیل رایانه‌ای مقایسه و با بهره‌گیری از فرمول‌های آیین‌نامه‌ای و نتایج حاصل از رفتار لرزه‌ای این ستونها، تأثیر فاصله و ضخامت قیدها بررسی گردیده‌است.

کلید واژه‌ها: قید افقی، ستون مشبک، کمانش، رفتار الاستو ـ پلاستیک، زلزله

۲ـ مقدمه

ستونها اعضای اصلی سازه به شمار می‌روند و مقاطع مختلفی برای آنها به‌کار می‌رود که در کشور ما به دلیل کمبود مقاطع بال پهن از ستونهای مشبک بخصوص ستونهای مشبک با قید افقی استفاده می‌شود که بار جانبی ناشی از نیروهای زلزله، مسأله‌ای بسیار حساس در خصوص این گونه ستونها می‌باشد.

در اکثر مراکز علمی اروپا و آمریکا مطالعاتی بر روی ستونهای مشبک با قید مورب انجام‌پذیرفته، امّا مقررات ملی ساختمانهای فولادی ایران مبحث ۱۰ ضوابطی در مورد ستونهای با قید افقی مطرح نموده‌است که برگرفته از آیین‌نامه DIN آلمان می‌باشد و علی‌رغم کاربرد قیدهای افقی در ستونهای مشبک، پژوهشهایی به‌صورت نظری و عملی سازماندهی نشده‌است[۱]. البته با در نظر گرفتن رفتار ویژه اعضای مذکور در هنگام زلزله، چنین پژوهشی لااقل در مرحله نظری ضروری می‌باشد. با توجه به اینکه ایران لرزه‌خیز است، طراحی باید به‌گونه‌ای باشد که سازه بتواند در برابر زلزله‌های محتمل رفتاری بدون خسارت داشته‌باشد[۲]. در طراحی لرزه‌ای استفاده از رفتار غیرخطی کنترل‌شده در اجزای سازه در زلزله‌های شدید مجاز می‌باشد. در هنگام زلزله مشاهده‌شده که در صورت عملکرد خطی اجزای سازه نیروهای وارده بر سازه چندین برابر بزرگتر از نیروهای آیین‌نامه‌ای می‌باشد؛ ولی

سازه‌ای که با حالت غیرخطی طراحی شده‌است تحمل چنین زلزله‌ای را داشته و خسارت وارده بر سازه کنترل می‌گردد. طراحی سازه برای رفتار ارتجاعی در هنگام وقوع زلزله مناسب و اقتصادی نیست و باید از رفتار هیسترزیس اجزای سازه در محدوده غیرارتجاعی استفاده نمود[۳].

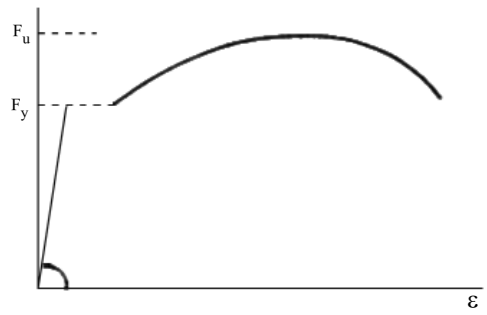
برای دستیابی به چنین رفتاری برنامه‌های رایانه‌ای مناسبی از جمله ANSYS وجود دارد که در محدوده خطی و غیرخطی قادر به تحلیل می‌باشد و در این مقاله برای تحلیل الاستو - پلاستیک و به‌دست آوردن بار کمانش ستونهای مشبک از آن استفاده و نتایج آن با رفتار واقعی این ستونها در زلزله‌های گذشته مقایسه شده‌است.

۳ - مروری مختصر بر مبانی طراحی ستونهای با قید افقی

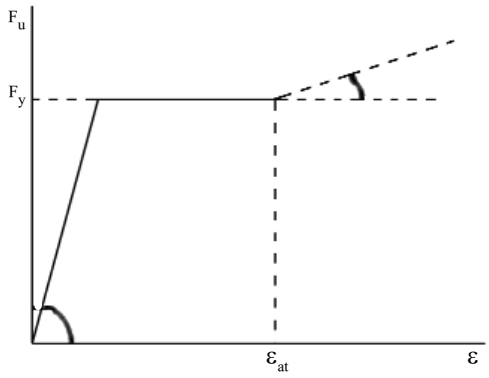
تفاوت عمده ستونهای مشبک با ستونهای دارای جان‌پر، تأثیر تغییر شکلهای برش جان این ستونها در مقدار بار محوری بحرانی آنها در کمانش حول محور عمود بر قیدها می‌باشد. برای در نظر گرفتن تأثیر تغییر شکلهای برشی در بار بحرانی ستون، ضریب لاغری ستونهای مشبک با ضریبی اصلاح می‌گردد. وضعیت ابعاد و فاصله قیدها در ضریب اصلاح لاغری ستون مؤثر می‌باشد و طبق توصیه آیین‌نامه ضریب لاغری اصلاح شده ستون مشبک قیددار حول محور عمود بر قیدها باید کوچکتر از ضریب لاغری ستون حول محور موازی قیدها باشد تا کمانش ستون حول محور موازی قیدها حالتی از شکست حاکم بر ستون باشد. در واقع قیدها (مهمترین اجزای ستون مشبک) وظیفه انتقال برش میان دو پروفیل و در نتیجه یکپارچگی و تبدیل به یک مقطع واحد را به عهده خواهند داشت. نیروی برشی مورد استفاده در قیدهای افقی برابر نیروی برشی موجود در ستون بعلاوه ۲٪ بار محوری ستونها می‌باشد. مقدار نیروی طراحی قیدها در آیین‌نامه با فرض اینکه ستون فقط تحت نیروی محوری باشد ارائه شده‌است و اگر ستون تحت اثر لنگر خمشی حول محور عمود بر قیدها قرار گیرد و یا دچار تغییرمکانهای بزرگتر شود، مقدار اضافه برش وارده بیشتر خواهد شد. در نتیجه، ممکن است شکست در قیدها به‌وجود آید. به همین دلیل، در آیین‌نامه توصیه شده‌است که ستونهای مشبک تحت اثر لنگر خمشی حول محور عمود بر قیدها قرار نگیرند[۴].

۴ - رفتار فولاد به عنوان مصالح مصرفی

رابطه تنش-کرنش فولاد به صورت نمودار(۱، الف) می‌باشد که معمولاً به صورت دو خطی فرض می‌شود. حالت ایده‌آل آن در نمودار(۱، ب) با خطوط پر رنگ نشان داده شده است. در تحلیل، مقادیر F_u و F_y در نظر گرفته می‌شوند. برای اینکه



الف: رابطهٔ حقیقی



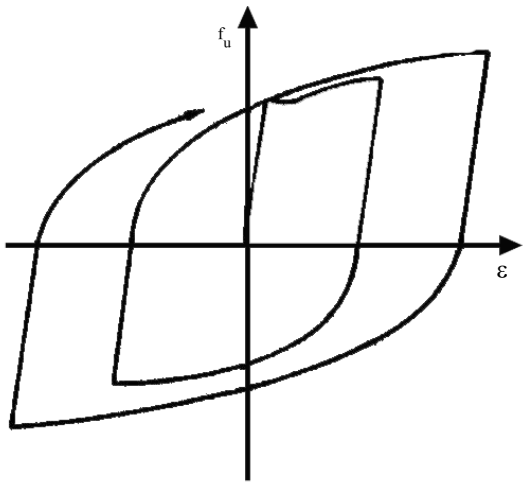
ب: رابطهٔ ایده‌آل

شکل (۱): رابطهٔ تنش-کرنش فولاد

یک سازه رفتار خوب و شکل‌پذیری مناسب داشته‌باشد باید:

- مصالح آن به صورتی عمل کند که تغییر طول شکل قبل از انهدام خیلی زیاد باشد و نسبت $\frac{F_y}{F_u}$ به یک نزدیک نشود؛
- جایی که عضو کششی دارای سوراخ می‌باشد قبل از تسلیم پاره نشود.

رابطه تنش- کرنش هیسترزیس برای فولاد تحت بارهای چرخه‌ای در شکل (۲) نشان داده شده‌است [۵].



شکل (۲): رفتار حقیقی هیسترزیس فولاد

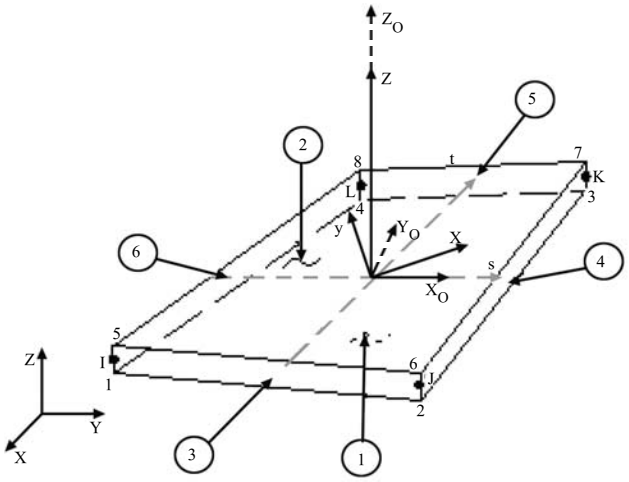
۵- جذب و استهلاک انرژی در بارگذاری متناوب و منحنی‌های هیسترزیس

میزان جذب انرژی در رفتار یک سازه به سطح زیر منحنی تنش- کرنش بستگی دارد. هر مقدار سطح زیر منحنی بیشتر باشد ظرفیت سازه در مقابل گسیختگی بیشتر خواهدبود. شکل منحنی هیسترزیس بدین صورت است که اگر سازه در محدودهٔ ارتجاعی نباشد و بارگذاری از حد ارتجاعی تجاوز کرده باشد تغییرشکل در سازه باقی خواهد ماند. در این صورت، بعد از باربرداری تغییر حالت در مسیر اولیه قرار نگرفته و به نقطه شروع باز نخواهد گشت. به دلیل این بارگذاری و باربرداری، یک حلقه تشکیل می‌شود که سطح داخلی آن نشان دهنده میزان انرژی تلف شده‌است. هر قدر حلقه پایدار و چاق‌تر شود میزان اتلاف انرژی نیز بیشتر می‌شود.

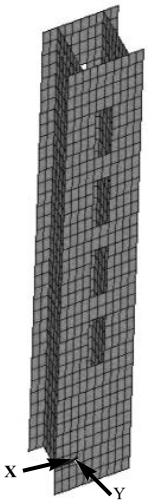
اصولاً سازه‌ها در محدوده ارتجاعی باقی نمی‌مانند و به مرحله غیرخطی می‌رسند که رفتار هیسترزیس آنها نشان دهنده رفتار آنها خواهدبود. هیسترزیس نیز به دو رفتار منظم و ثابت و نامنظم تقسیم می‌شود که شکل نمودار هیسترزیس به دست آمده از تحلیل، نشان دهنده رفتار سازه در محدوه غیرخطی است. در مباحث بعدی مدل‌های مورد بررسی گواه این مطلب است [۵].

۶- مدلسازی

به‌منظور مدلسازی از نرم‌افزار ANSYS استفاده شده‌است. کتابخانهٔ اجزای برنامه ANSYS، ۱۸ گروه اعضا دارد که شامل بیش از ۱۰۰ نوع عضو است و طیف وسیعی از مسائل مهندسی به این روش قابل حل می‌باشد. برای مدلسازی از عضو Shell181 با پوستهٔ سه بعدی چهارگرهی و با شش درجه آزادی در هر گره استفاده شده‌است (شکل ۳، الف). این عضو توانایی اعمال تمامی خواص غیرخطی را دارد. در برنامه ANSYS اتصال قطعات به صورتهای مختلف انجام می‌شود. به عنوان مثال، اتصال گره به گره، صفحه به صفحه و ...؛ ولی این عمل برای طراحی ستونها کار دشواری است و به دلیل عدم اطلاع از رفتار واقعی جوش امکان انجام دقیق آن نیست؛ بنابراین برای حصول شرایط جوش کامل و با فرض اینکه جوش دقیق انجام شده‌است سطوح اتصال، یکپارچه تصور می‌شود. برای شبکه‌بندی اعضا از روش شبکه‌بندی دستی که قدرت عمل بیشتری برای شبکه‌بندی دارد استفاده شده‌است. ستونی یک سر گیردار یک‌سر آزاد با ارتفاع ۱۸۰ سانتیمتر از 2IPE16 با فاصله قید ۴۰،۳۰ و ۵۰ سانتیمتر و ضخامت ۰/۸، ۱ و ۱/۲ سانتیمتر طرح و مورد بررسی قرار گرفته‌است (شکل ۳،ب)



الف: هندسه و موقعیت گرههای عضو shell181



ب: نمونه‌ای از ستونهای طراحی شده

شکل (۳): مش‌بندی ستونهای مشبک

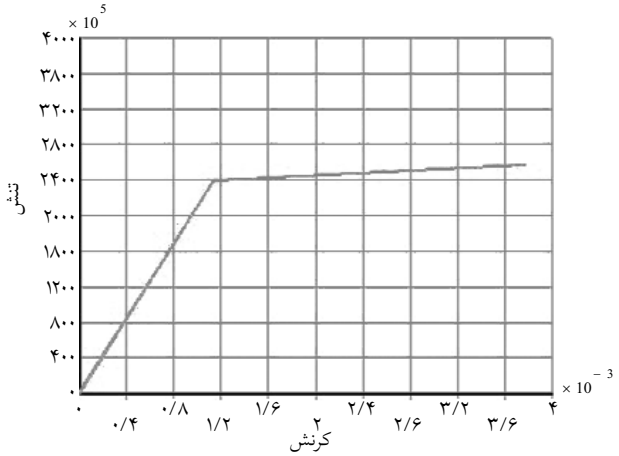
[۶]. برای نشان دادن مدل واقعی نیز از تصاویر ستونهای تحت اثر زلزله بم استفاده شده‌است .

۷ ـ تحلیل غیرخطی هندسی و مصالح

برای تحلیل ستون مشبک از تحلیلهای غیرخطی هندسی و مصالح استفاده‌شده‌است. تحلیل غیرخطی هندسی بکارگرفته شده عبارت است از اثر تغییر شکلهای بزرگ در تحلیل کمانشی ستون هنگامی‌که تحت تأثیر بار ثقلی قرار گرفته‌است.

فولاد یک مادهٔ چکش خوار است و خواص غیرخطی از خود نشان می‌دهد (نسبت تنش ـ کرنش آن دائماً در حال تغییر است) که بواسطه تسلیم بر اثر شرایط خمیری و سخت‌شدگی کرنشی حاصل می‌شود. نرم‌افزار ANSYS این امکان را فراهم می‌کند که کاربر بتواند خواص مد نظر را به حد واقعی نزدیک کند. برای رفتار مصالح عضو Shell 181 و یک رابطه تنش ـ کرنش دو خطی الاستیک خطی و پلاستیک با سخت‌شوندگی 0.03E در نظرگرفته شده‌است (شکل۴)، [۶]. از فولاد با مقادیر تنش جاری شدن و ضریب ارتجاعی مطابق رابطه (۱) استفاده شده‌است.

$$Fy = 2400 kg/cm^2 , E = 2.1\times 10^6 kg/cm^2 \qquad (۱)$$



شکل (۴): منحنی تنش-کرنش دوخطی برای رفتار الاستو-پلاستیک مصالح

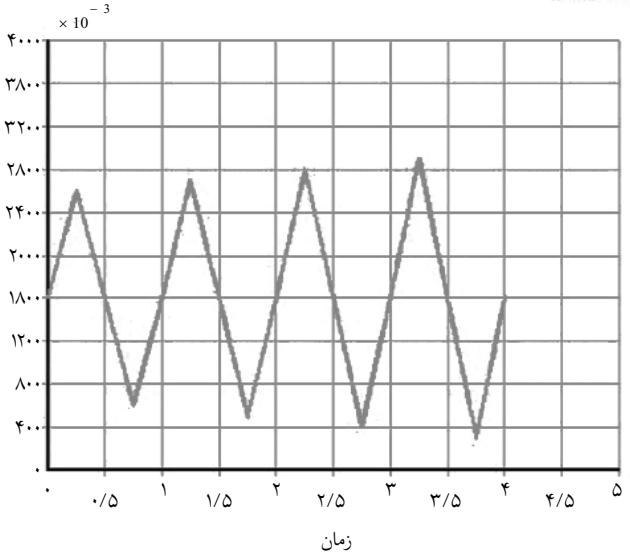
در تحلیل ستونهای مشبک برای بررسی رفتار الاستو ـ پلاستیک مصالح، بهترین راه، تشخیص رفتار و خصوصیات سازه در بارگذاری رفت و برگشتی می‌باشد که منحنی هیسترزیس اعضاء از آن ناشی می‌شود. در مشاهده میزان انرژی جذب زلزله، تحلیل با بار افزاینده جانبی مشخص‌کننده نیست و تحلیل تاریخچه زمانی به دلیل تغییرات ناهماهنگ بارگذاری، امکان مشاهده نمودار هیسترزیس واضحی را به کاربر نمی‌دهد؛ بنابراین از بارگذاری رفت و برگشتی (Cyclic) بر پایه اعمال تغییر مکان در نقطه‌ای در بالای ستون استفاده شده‌است که ورودی به برنامه به‌صورت شکل (۵) می‌باشد.

۸ ـ نتایج حاصل از تحلیل رایانه‌ای و اثر زلزله طبیعی

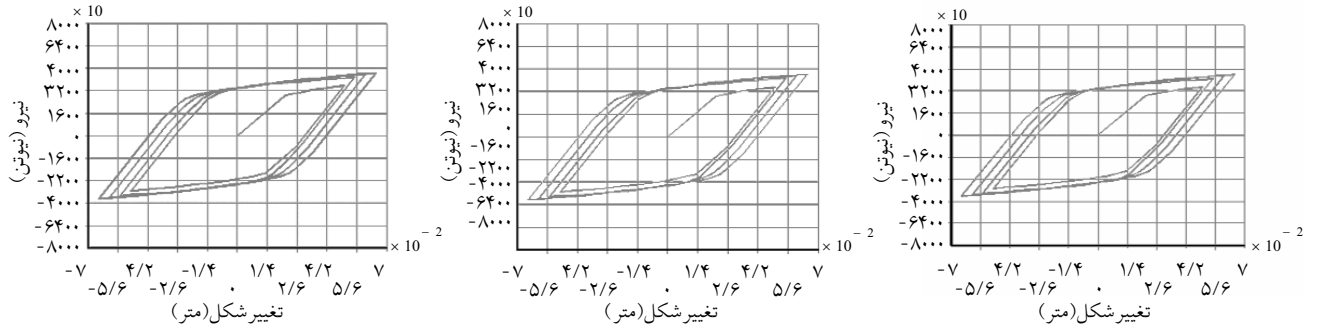
منحنی‌های هیسترزیس ستونهای مشبک با قید افقی در فواصل و ضخامتهای متغیر در این قسمت مورد نقد و بررسی قرار گرفته‌اند.

۸ - ۱ - مشاهده نتایج تحلیل رایانه‌ای

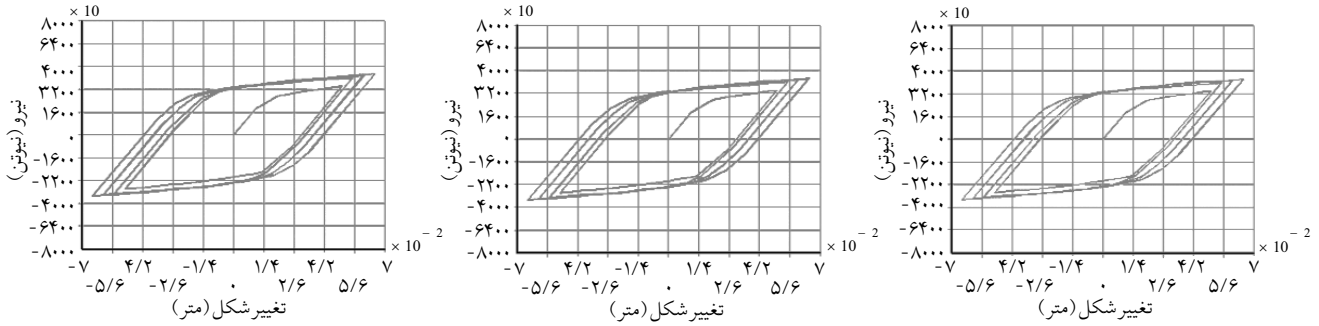
در این مرحله برای ستونهای بدون ورق پایه، با ورق پایه و ورق سرتاسری، تحلیل غیرخطی (الاستو ـ پلاستیک) مراحل انجام و نتایج به‌دست آمده به‌صورت نمودارهای هیسترزیس ارائه و بررسی گردیده‌اند (شکلهای ۶ تا ۱۰).



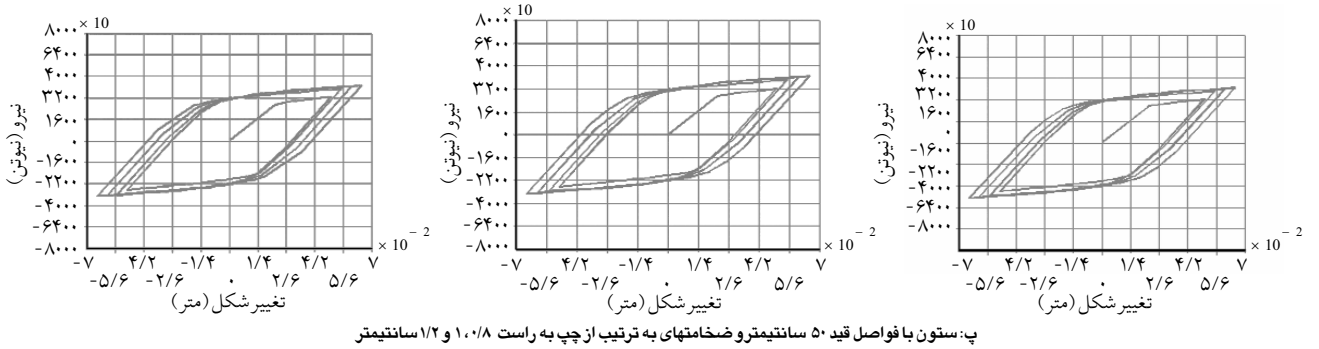
شکل (۵): منحنی ورودی بارگذاری ستون بر اساس اعمال جابه‌جایی



الف: ستون با فواصل قید ۳۰ سانتیمتر و ضخامتهای به ترتیب از چپ به راست ۱، ۰/۸ و ۱/۲ سانتیمتر

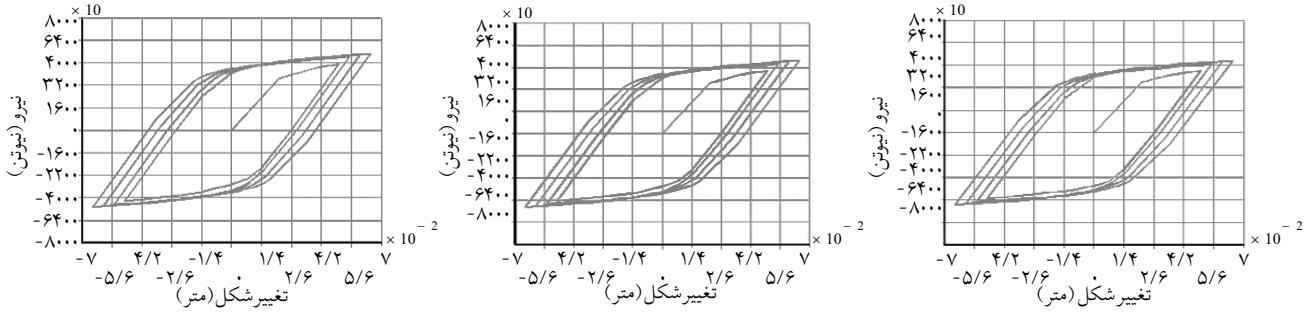


ب: ستون با فواصل قید ۴۰ سانتیمتر و ضخامتهای به ترتیب از چپ به راست ۱، ۰/۸ و ۱/۲ سانتیمتر

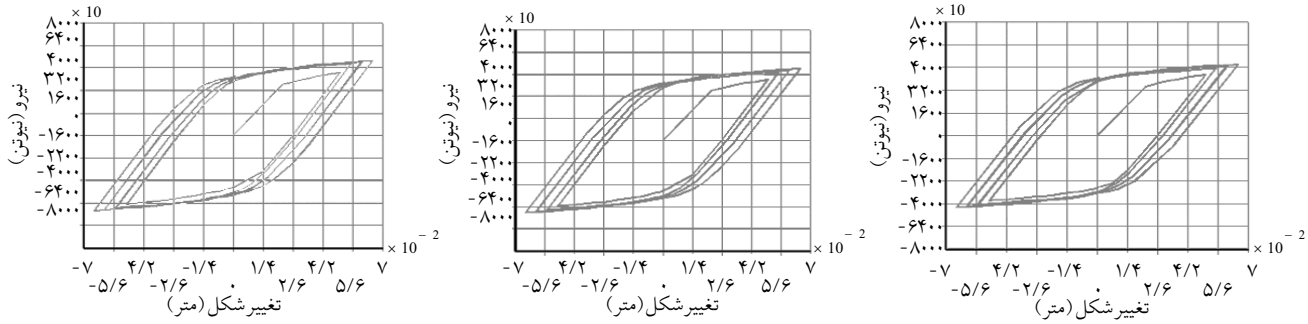


پ: ستون با فواصل قید ۵۰ سانتیمتر و ضخامتهای به ترتیب از چپ به راست ۱، ۰/۸ و ۱/۲ سانتیمتر

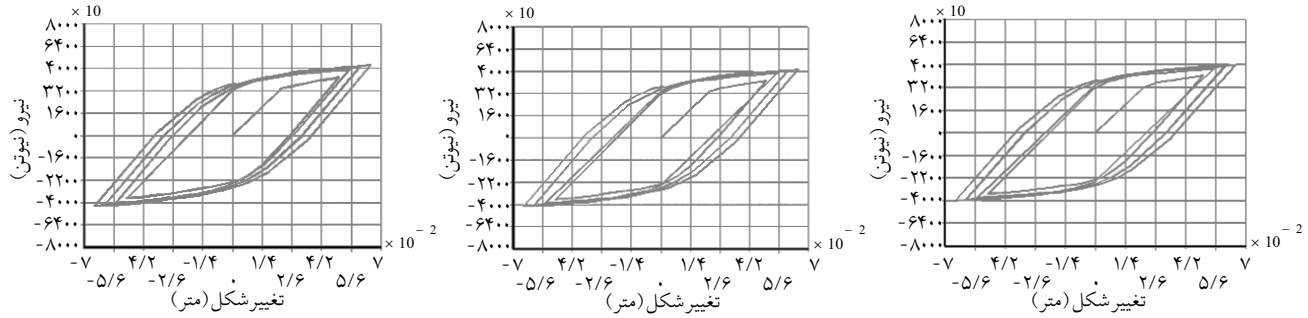
شکل (۶): منحنی‌های هیسترزیس ستون مشبک با قید بدون ورق پایه



الف: ستون با فواصل قید ۳۰ سانتیمتر و ضخامتهای به ترتیب از چپ به راست ۱، ۰/۸ و ۱/۲ سانتیمتر

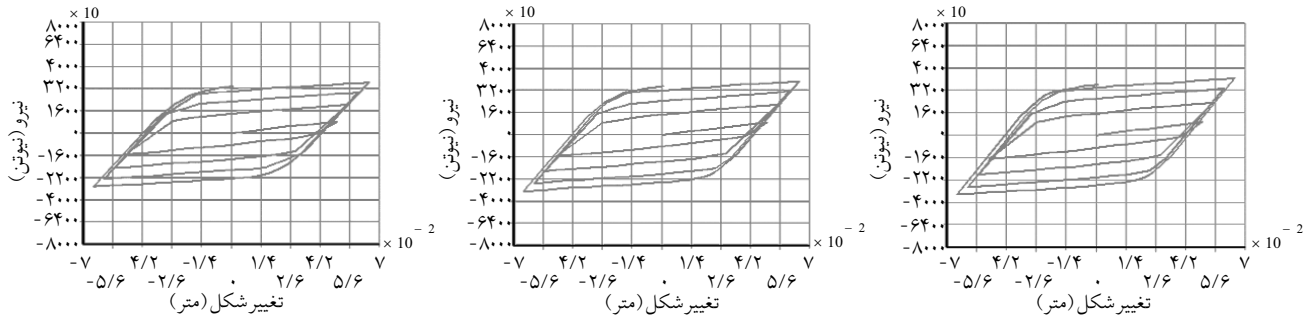


ب: ستون با فواصل قید ۴۰ سانتیمتر و ضخامتهای به ترتیب از چپ به راست ۱، ۰/۸ و ۱/۲ سانتیمتر

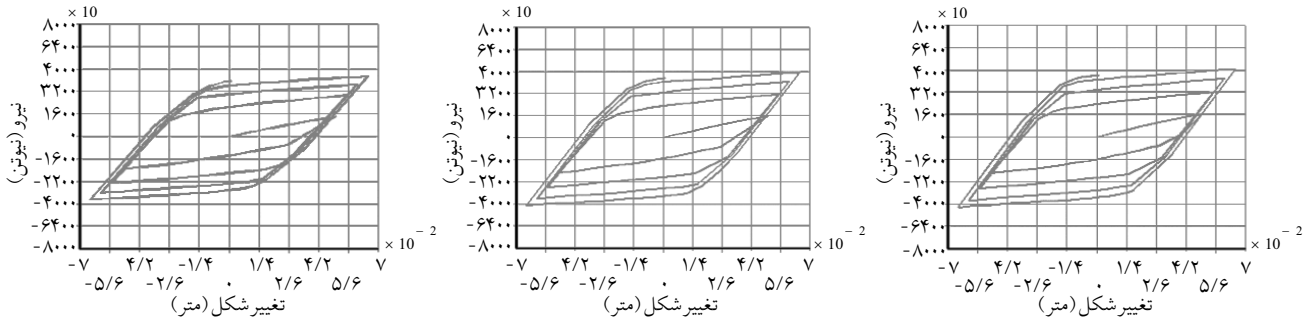


پ: ستون با فواصل قید ۵۰ سانتیمتر و ضخامتهای به ترتیب از چپ به راست ۱، ۰/۸ و ۱/۲ سانتیمتر

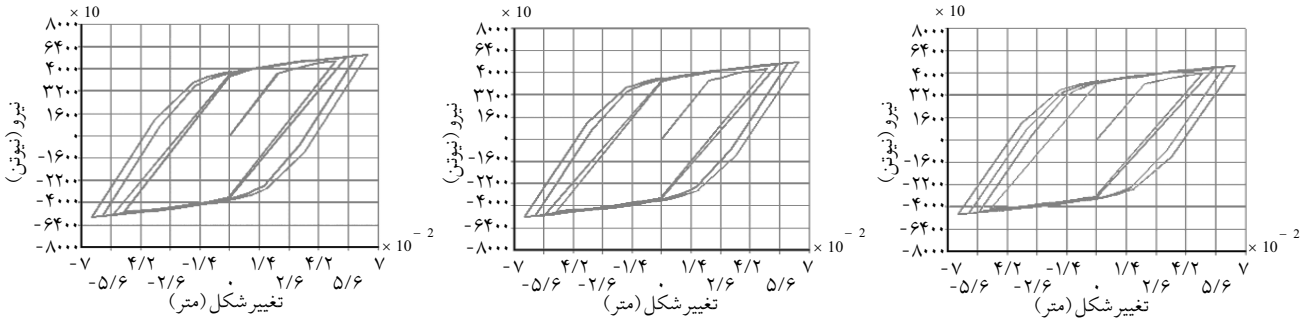
شکل (۷): منحنی‌های هیسترزیس ستون مشبک با قید و ورق تقویتی پایه



شکل(۸): منحنی هیسترزیس ستون با قید و ضخامت یک سانتیمتر از چپ به راست ۳۰، ۴۰ و ۵۰ سانتیمتر با افزایش بار قائم



شکل(۹): منحنی هیسترزیس ستون با قید و ضخامت یک سانتیمتر از چپ به راست ۳۰، ۴۰ و ۵۰ سانتیمتر با افزایش بار قائم و ورق تقویتی پایه



شکل(۱۰): منحنی‌های هیسترزیس ستون با قید سرتاسری با ضخامتهای از چپ به راست ۰/۸، ۱ و ۱/۲ سانتیمتر

۸ - ۲ - مشاهده اثر زلزله بم در ستونهای با قید افقی

برای این قسمت از نتایج اثر زلزله بم بر روی ستونهای با قید افقی استفاده شده‌است. همچنان که از تصاویر پیداست در زلزله بم غالباً تخریب در ستونها به‌علت کمانش جانبی و کمانش موضعی ستونهای مشبک و نیز شکسته شدن ستون در محل وصله به‌وجود آمده‌است که مختصری از علل و راهکارها توضیح داده شده‌است.

تصویر (۱) مبیّن آن است، که به‌علت فاصله زیاد قیدها و توزیع نامناسب بار دچار کمانش کلی و خروج از مرکزیت شده است. نکته قابل توجه در این شکل، وقوع کمانش کلی ستون حول محور عمود بر قیدهاست که از نظر آیین نامه (مبحث دهم مقررات ملی) مطلوب نیست. ضریب طول مؤثر باید در جهت محور عمود بر بستها بیشتر از جهت دیگر در نظر گرفته می‌شد و عدم وجود بادبند مناسب در جهت محور عمود بر قیدها نیز این امر را تشدید کرده‌است و این مسأله یکی از پارامترهای قابل

تصویر (۱): کمانش کلی ستون حول محور عمود بر قیدها

تأمل در پیچیدگی رفتار ستونهای با قید افقی است.

در تصویر (۲) یک ستون قید دار کوتاه فولادی نشان داده شده‌است. عضو تحت اثر نیروهای برشی متأثر از زلزله قرار گرفته و به‌علت اجرای نامناسب جوشکاری و فاصله زیاد

قیدها، دچار تغییر شکل شده‌است. در بررسی دقیق کل ساختمان مشخص شد که فقط این ستون دچار تغییر شکل شده‌است. در محاسبه ستونهای قید داری که قسمتی از آن در شرایط ستون کوتاه، قرار می‌گیرد محاسبه جامعتر و دقیق‌تر برای آن قسمت از ستون نسبت به ارتفاع کل ستون در یک سازه نیاز است؛ زیرا ستون کوتاه، انرژی بیشتری را در هنگام زلزله جذب می‌کند. در نتیجه چنین ستونی دچار آسیب بیشتری می‌شود. پس باید در آن قسمت از مقطع، ابعاد قید قویتر یا از ورق تقویتی استفاده شود.

تصویر (۲): تغییر شکل ستون قیددار کوتاه فولادی بر اثر اجرای نامناسب جوش و فاصله زیاد قیدها

متأسفانه در آیین‌نامه‌ها بویژه آیین‌نامه ۲۸۰۰ در این زمینه ضوابط مناسبی آورده نشده‌است و چاره‌اندیشی در این زمینه ضروری است؛ زیرا تخریب بسیاری از ساختمانها در زلزله بم بر اثر این نقص بوده‌است. در مواردی که ستونها در یک جهت بادبندی نمی‌شوند، تعیین برش عرضی اضافی ناشی از بار جانبی برای افزایش مقاومت ستون ضروری است.

در تصویر (۳) به‌نظر می‌رسد که ستونکها ابتدا دچار کمانش موضعی شده‌اند که خرابی کلی ستونها ناشی از این مسأله و عدم بادبندی مناسب است. نتایج تحلیل رایانه‌ای نیز نشان داد که فاصله و ضخامت قیدها تأثیر بسزایی در مقاومت ستون دارد که مشابه آن در این شکل مشخص است؛ زیرا اگر فاصله قید با میزان بار هماهنگی نداشته باشند احتمال شکست موضعی بیشتر است.

تصویر (۳): تخریب کلی ستونها بر اثر کمانش موضعی ستونکها و مهاربندی نامناسب

تصویر (۴) مصداقی واقعی از اجرای نادرست در اتصالات و عدم بادبندی می‌باشد؛ زیرا قیدها به‌طور کامل از ستون جدا شده‌اند و این ناشی از جوشکاری نامناسب و ضعف در ابعاد و فاصله قیدها می‌باشد.

تصویر (۴): جدایی قیدها از ستون بر اثر اجرای نادرست اتصلات و عدم بادبندی

۹ ـ نتیجه گیری

ستونهای مشبک با قید افقی سالهاست که یکی از بحرانی ترین اجزای سازه‌ای در ساختمانهای ایران به‌شمار می‌روند که بار و نیروهای وارده را به پی ساختمان انتقال می‌دهند. در آیین‌نامه‌های سازه‌های فولادی به‌صورت جزئی و محدود در رابطه با نحوه محاسبه این نوع ستونها که تغییرشکلهای برشی در راستای محور بدون مصالح، از مشکلات اصلی آن می‌باشد بحث شده‌است. برای این امر با استفاده از برنامه‌های رایانه‌ای و در بعد نظری تحلیلهایی انجام‌شد و با حالتهای تخریب ستون بر اثر زلزله‌های واقعی مقایسه شد. اهم نتایج به‌دست آمده عبارتند از:

۱ ـ کم شدن فاصلهٔ بین قیدها از یکدیگر، باعث افزایش مقاومت و شکل‌پذیری بهتر می‌شود.

۲ ـ منحنی‌های هیسترزیس، مبیّن آن است که کم کردن فواصل قیدها و افزایش ضخامت قید باعث جذب انرژی بیشتر افزایش سطح زیر منحنی خواهدشد.

۳ ـ افزایش بار قائم باعث بی‌نظمی منحنی‌های هیسترزیس شده‌که نشان‌دهنده عدم مقاومت ستون در شرایط یکسان بار جانبی و بار قائم بیشتر می‌باشد و لزوم استفاده از سقف سبک و بار مرده کمتر توصیه می‌شود.

۴ ـ منحنی‌های هیسترزیس ستون با ورق پایه، نسبت به مدل‌های بدون ورق پایه شکل منظم‌تری دارند. این مسأله نشان دهندهٔ تأثیر مهم ورق پایه می‌باشد.

۵ ـ دلیل افزایش بار محوری و جذب انرژی بیشتر ستونها در شرایطی که فواصل قیدها کم می‌شود این است که ستونکها دیرتر دچار کمانش موضعی شده‌و کمانش در کل ستون انجام می‌شود و رفتار بهتری در جذب انرژی دارد.

۶ ـ میزان جذب انرژی ستونهای با قید سرتاسری بیشتر از ستونهای قید می‌باشد و عملکرد آنها بهتر است.

۷ ـ اثر فاصله وضخامت قیدها تأثیر بسزایی در رفتار این ستونها دارد و آثار زلزلهٔ بم بر روی این نوع ستونها نیز گواه این مطلب است.

۱۰ ـ مراجع

۱. دفتر نظامات مهندسی. (۱۳۷۳). مقررات ملی ساختمان مبحث ۱۰. طرح و اجرای ساختمانهای فولادی. تهران: مؤلف

۲. سالمن، چالز. جی؛ جانسن، جان. ای. (تابستان ۱۳۷۵). طرح و محاسبه سازه‌های فولادی. ترجمه فریدون ایرانی. مشهد: دانشگاه فردوسی، ۳۱۷ تا ۳۸۴.

۳. پیمان زندی، امیر. گزارش فنی مقدماتی و فوری زلزله ۳۱ خرداد ماه ۱۳۶۹ منجیل (منطقه گیلان و زنجان). (مرداد ۱۳۶۹). تهران: مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

۴. مگردیچیان، آرک. (مهرماه ۱۳۶۸). طرح و محاسبه ساختمانهای فلزی. تهران: انتشارات دهخدا، ۳۲۳ تا ۴۶۹.

۵. واکا. بایاشی، مینورو. (۱۳۷۴). طراحی ساختمانهای مقاوم در برابر زلزله. (ترجمه محمد مهدی سعادت‌پور). اصفهان: دانشگاه صنعتی اصفهان، ۹۰ تا ۲۲۳.

6. User's manual for ANSYS Version 8.0, ANSYS Engineering Analyses System.