بررسی تاثیر فواصل و ابعاد بست‌ها در کاهش بار کمانش جانبی ستون های نردبانی با مقطع دوبل I شکل و دوبل C شکل

جابر حمایتی
دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بندرعباس، بندرعباس، ایران
احمد رهبر رنجی*
دانشیار، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
rahbar@aut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۷/۲۰ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۵/۱۲/۱۲

چکیده:

ستون‌های مرکب فولادی با بست‌های موازی یکی از انواع رایج ستون‌های بکار رفته در ساختمان‌های فولادی موجود در کشور است. با وجود تحقیقات بسیاری که بر روی رفتار این ستون‌ها صورت گرفته، تاثیر ابعاد و فواصل بست‌ها در بار کمانشی این ستون‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در طراحی اعضای فشاری علاوه بر معیار مقاومت، باید معیار پایداری نیز مورد بررسی قرار بگیرد به عبارت دیگر اعضای تحت فشار یک سازه، پیش از رسیدن به حداکثر مقاومت فشاری و در حقیقت پیش از شکست تحت اثر پدیده کمانش دچار شکست خواهند گردید. کمانش یکی از ناپایداری‌های عمده اعضا سازه‌ای است و عاملی مهم در طراحی ستون‌های نردبانی به شمار می‌آید بنابراین پدیده کمانش این ستون‌ها یکی از حالاتی می‌باشد که می‌بایست کنترل شود. در این تحقیق ۱۰ نمونه ستون با مقطع دوبل I شکل و ۶ نمونه ستون با مقطع دوبل ناودانی بصورت نردبانی با فواصل مختلف بست‌ها تحلیل شدند. مقطع کلیه ستون‌ها دوبل IPE140 و UNP140 می‌باشد. در نهایت بار کمانشی الاستیک این ستون‌ها در حالات مختلف بست‌های موازی از نظر ابعاد و فاصله با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس بدست آمد و با روابط موجود در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد بار کمانشی ستون با مقطع دوبل IPE140 حاصل از روابط مبحث دهم مقررات ملی ساختمان متناسب با بارکمانشی همان ستون با بست PL180×100×6 به فاصله آکس به آکس ۶۰۰ میلی‌متر از هم می‌باشد و بار کمانشی ستون با مقطع دوبل UNP140 متناسب با بارکمانشی همان ستون با بست PL140×100×4 به فاصله آکس به آکس ۴۰۰ میلی‌متر از هم می‌باشد.

کلید واژگان: تحلیل عددی، ستون نردبانی، بست، کمانش جانبی

۱- مقدمه

ستون‌ها ممکن است در مکان‌ها و یا ارتفاع‌های مختلفی در یک ساختمان قرار گیرند. بدین دلیل، بسته به موقعیت ستون و نوع سازه، شرایط تکیه‌گاهی مختلفی بر این ستون‌ها حاکم است. بدیهی است که شرایط تکیه‌گاهی مناسب و منطقی می‌بایست بر اساس ارزیابی دقیق اتصالات ستون و اجزای سازه‌ای مجاور به آن تعیین گردند. ستون عنصری است که معمولا به صورت عمودی در ساختمان نصب می‌شود و بارهای کف ناشی از طبقات به تیر و شاه‌تیر به آن منتقل می‌گردد و توسط آن به پی و سپس به زمین انتقال می‌یابد. شکل سطح مقطع ستون‌ها معمولا به مقدار و وضعیت بار وارد شده بستگی دارد. برای ساختن ستون‌های فلزی از انواع پروفیل‌ها و ورق‌ها استفاده می‌شود. ستون‌ها ممکن است بر حسب نیاز با ترکیب و اتصالات متنوع از انواع پروفیل‌های مختلف ساخته شوند، اما رایج‌ترین اتصال‌ها برای ساخت ستون‌ها سه نوع است: الف) اتصال دو پروفیل به یکدیگر به طریقه دوبله کردن، ب) اتصال دو پروفیل با یک ورق سراسری روی بال‌ها، ج) اتصال دو پروفیل با بست‌های فلزی(تسمه) که از متداول‌ترین نوع ستون در ایران ستون‌های مرکبی است که دو تیرآهن به فاصله معین از یکدیگر قرار می‌گیرد و قیدهای افقی یا چپ یا راست این دو نیمرخ را به هم متصل می‌کند. هرچند ستون‌های مرکب فولادی با بست موازی یکی از انواع رایج‌ترین ستون‌های بکار رفته در ساختمان‌های فولادی موجود در کشور است با وجود تحقیقات بسیاری که بر روی رفتار محوری این نوع ستون‌ها صورت گرفته کمتر عملکرد لرزه‌ای آن‌ها بررسی شده است تجربیات زلزله‌های گذشته بخصوص زلزله بم نشان داد که این نوع ستون‌ها علیرغم رفتار مناسب تحت اثر بارهای ثقلی در برابر بارهای لرزه‌ای بسیار آسیب پذیرند. در طراحی اعضای فشاری می‌بایست این نکته را مورد توجه قرار داد که به دلیل لاغری و ظریف بودن مقاطع فولادی، ممکن است خرابی در سازه قبل از آن که تنش‌ها در مقطع به حد تسلیم برسند اتفاق بیافتد. در این حالت عضو تحت فشار در جهت عمود بر محور خود بطور ناگهانی دچار تغییر شکل جانبی شده که به این پدیده کمانش یا ناپایداری گویند. بنابراین در طراحی اعضای فشاری علاوه بر معیار مقاومت، باید معیار پایداری نیز مورد بررسی قرار بگیرد به عبارت دیگر اعضای تحت فشار یک مطالعات انجام شده که در ادامه آورده شده است اشاره کرد. چن و لی[1] (۲۰۱۳) به بررسی تحلیلی کمانش ستون‌های نردبانی فولادی پرداختند. در این مطالعه ستون در ۴ حالت سطح مقطع بررسی گردید. و در نهایت بار کمانشی برای تمامی نمونه‌های پیشنهادی با یکدیگر مقایسه گردید[۳]. دبان و همکاران[2] (۲۰۱۵) به بررسی آزمایشگاهی ستون‌های نردبانی دارای مقطع دوبل C شکل پرداختند. بارگذاری بر روی این ستون‌ها بصورت محوری می‌باشد و اثر مشخصات هندسی بست‌ها در لاغری این ستون‌ها بررسی شد[۴]. الاقوری و همکاران[3] (۲۰۱۵) به بررسی آزمایشگاهی و عددی ستون‌های نردبانی دارای مقطع دوبل C شکل پرداختند. بارگذاری بر روی این ستون‌ها بصورت محوری با خروج از مرکزیت در دوجهت x و y می‌باشد و تحلیل عددی سازه، پیش از رسیدن به حداکثر مقاومت فشاری و در حقیقت پیش از شکست تحت اثر پدیده کمانش دچار شکست خواهند گردید. هرچه ستون بلندتر و سطح مقطع کوچکتری داشته باشد(ستون لاغر)، زودتر تحت اثر پدیده کمانش قرار می‌گردد. در دهه‌های اخیر ستون‌های مرکب مزدوج I شکل اجرا شده در ایران جایگزین ستون‌های H شکل (IPB) شده است. ستون‌های مرکب مزدوج I شکل به‌صورت گوناگون مورد استفاده قرار می‌گیرند. در بعضی طرح‌های اجرا شده، مقطع مرکب از دو نیمرخ IPE و یا دو نیمرخ C شکل به‌هم چسبیده، با اتصال جوش شیاری نفوذ کامل، تشکیل شده است، که مقطع ستون به شکل قوطی در می‌آید. رفتار این ستون‌ها مشابه ستون‌های قوطی می‌باشد و آیین‌نامه‌های طراحی فولادی برای آن صدق می‌کند. دسته دوم ستون‌های مرکب فاصله‌دار (پاباز) هستند که با ورق سراسری به هم متصل گشته‌اند. دسته سوم ستون‌های مرکب متشکل از دو نیمرخ IPE و یا C شکل فاصله‌دار (پاباز) هستند، که توسط قیدهای مستطیلی افقی یا مورب متصل گشته‌اند[۱]. که در بسیاری از ساختمان‌های فولادی ساخته شده در گذشته، از این ستون‌ها استفاده شده است. بررسی و مطالعه خسارت‌ها ساختمان‌های دارای ستون‌های مرکب در زلزله‌های گذشته نشان دهنده ضعف‌های رفتاری قابل ملاحظه و شکست‌های زیاد در این ستون‌ها است. از این‌رو، بیشتر ساختمان‌های دارای ستون‌های مرکب با بست افقی ساخته شده در گذشته نیازمند بهسازی لرزه‌ای خواهند بود. با توجه به عدم رواج استفاده از این ستون‌ها در سایر مناطق لرزه‌خیز دنیا، در مورد رفتار آن‌ها مطالعات زیادی انجام نشده است[۲]. که در این تحقیق به بررسی این روش‌ها پرداخته خواهد شد. همچنین با توجه به کارایی ستون‌های نردبانی در ساختمان‌های فولادی و اهمیت مساله کمانش جانبی با افزایش لاغری ستون، در این پژوهش، به دنبال روش عددی برای تعیین کمانشی ستون‌های نردبانی با مقطع C شکل و I شکل تحت بارگذاری فشاری هستیم. در این تحقیق تحلیل کمانشی با نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام می‌شود. برای بررسی درستی نتایج اجزای محدود، این نتایج با روش‌های تئوریک بیان شده در مراجع دیگر و آیین‌نامه‌های معتبر مقایسه می‌شوند. تحقیقات فراوانی در زمینه بررسی رفتار ستون‌های نردبانی انجام شده است که در این میان می‌توان به با نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام شد. در نهایت نتایج حاصل از تحلیل عددی را با نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی مقایسه کردند[۵]. حسینی هاشمی و جعفری[4] (۲۰۱۲) به بررسی آزمایشگاهی رفتار ستون‌های نردبانی پرداختند. در این مطالعه بارگذاری بصورت جابجایی جانبی بر نمونه‌ها اعمال گردید. و در نهایت به بررسی نمودارهای بار-جابجایی و بررسی اثر لاغری در این ستون‌ها در مکانیزم خرابی آن‌ها پرداختند[۶].

جاویدی نژاد و آروسپیس[5] (۲۰۱۲) کمانش تیرها و ستونهای تحت بارهای محوری و افقی (جانبی) با موقعیت های بار محوری را مورد مطالعه قرار داد. این کار با استفاده از روش اجزاء محدود برای تعیین رفتار کمانشی و بارهای بحرانی کمانشی تیر I شکل صورت گرفته

[1] Chen J.K., Li L.Y.
[2] Dabaon M. et. al.
[3] ElAghoury M.A. et. al.
[4] Hosseini Hashemi B., jafari S.M.
[5] Javidinejad A., Aerospace Z.

است[۷]. ساهو و ری[1] (۲۰۰۷) به بررسی عددی رفتار ستون‌های نردبانی با مقطع دوبل C شکل پرداختند. برای مطالعه عددی از نرم افزار اجزای محدود آباکوس استفاده گردید. در این مطالعه ۳ نمونه ستون برای حالات مختلف سخت‌کننده بررسی شدند. بارگذاری بصورت بار محوری و جابجایی جانبی بر نمونه‌ها اعمال گردید[۸]. شی و همکارانش[2] (۲۰۱۴) به بررسی کمانش مقاطع ساخته شده از تیرورق به شکل قوطی و I پرداختند. در این مطالعه ۱۳ نمونه ستون در دو گروه a و b قرار داده شدند و در حالت ستون دو سر مفصل مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفتند[۹].

۲- روش تحقیق

فواصل و ابعاد بست‌ها در کمانش جانبی ستون‌های نردبانی با مقطع دوبل I شکل و C شکل تاثیر زیادی دارد که بررسی این مساله با نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس امکان‌پذیر است.

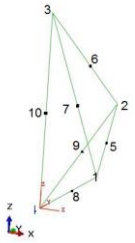
بار بحرانی ستون‌های نردبانی توسط نرم‌افزار آباکوس می‌تواند بررسی شود. همچنین بار بحرانی بدست آ مده از راب طه

$$P_{cr}=\frac{\pi^2 EI}{(kl)^2}$$

با بار بحرانی حا صل از تحلیل عددی ستون با نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس تطابق خوبی دارد.

۳- المان C3D10

نرم‌افزار آباکوس از یک المان سه بعدی، C3D10 (از دسته المان های Solid)، برای تحلیل رفتار غیرخطی مصالح نرم نظیر فولاد استفاده می‌کند. این المان سه بعدی و۱۰ گره‌ای است. این المان از نوع Solid برای تحلیل تنش یا تغییر مکان است. الگوی المان C3D10 در شکل (۱) آورده شده است[۱۰ و ۱۱].



شکل ۱- الگوی المان C3D10 [۱۰]

۴- نمونه‌های مدل سازی شده در نرم‌افزار

در این تحقیق ۱۹ نمونه ستون با مقطع دوبل I شکل و ۱۲ نمونه ستون با مقطع دوبل ناودانی بصورت نردبانی با فواصل مختلف بست‌ها تحلیل شدند. مقطع کلیه ستون‌ها دوبل IPE140 و UNP140 می باشد. ابعاد بست‌ها در مقاطع دوبل I شکل ۱۰۰×۱۸۰ میلی‌متر و با ضخامت‌های ۴، ۶ و ۸ میلی‌متر و با فواصل آکس به آکس ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر از یکدیگر است. همچنین ابعاد بست‌ها در مقاطع دوبل C شکل ۱۰۰×۱۴۰ میلی‌متر و با ضخامت‌های ۴ و ۶ میلی‌متر و با فواصل آکس به آکس ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر از یکدیگر است.

نتایج حاصله از تحلیل با نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس با نتایج حاصل از رابطه بار کمانشی الاستیک موجود در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان در خصوص ستون‌های نردبانی مقایسه گردید. بمنظور دقت در مدلسازی و رفع خطاهای احتمالی، ابتدا مقطع دوبل I شکل و با ابعاد متفاوت مش‌بندی و در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس مدل‌سازی گردید و آنالیز شد سپس بعد از اطمینان از صحت نتایج اقدام به مدل سازی مقاطع نردبانی ستون‌ها پرداخته شد. در جدول (۱) مقاطع بررسی شده آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات نمونه های بررسی شده

ردیف	نام نمونه	طول ستون (متر)	ضخامت تسمه (میلی‌متر)
۱	2I140C70	۶	---
۲	2I14C140PL180×100×4@400	۶	۴، ۶ و ۸
۳	2I14C140PL180×100×4@600	۶	۴، ۶ و ۸
۴	2I14C140PL180×100×4@800	۶	۴، ۶ و ۸
۵	2I14C14PL180×100×6@400	۶	۴، ۶ و ۸
۶	2I14C140PL180×100×6@600	۶	۴، ۶ و ۸
۷	2I14C140PL180×100×6@800	۶	۴، ۶ و ۸
۸	2I14C140PL180×100×8@400	۶	۴، ۶ و ۸
۹	2I14C140PL180×100×8@600	۶	۴، ۶ و ۸
۱۰	2I14C140PL180×100×8@800	۶	۴، ۶ و ۸
۱۱	2U140D60PL140×100×4@400	۶	۴ و ۶
۱۲	2U140D60PL140×100×4@600	۶	۴ و ۶
۱۳	2U140D60PL140×100×4@800	۶	۴ و ۶
۱۴	2U140D60PL140×100×6@400	۶	۴ و ۶
۱۵	2U140D60PL140×100×6@600	۶	۴ و ۶
۱۶	2U140D60PL140×100×6@800	۶	۴ و ۶

جهت انتخاب ابعاد المان مناسب برای مش‌بندی نمونه‌های بررسی شده، مقطع ستون 2I140C70 با ابعاد المان ۲۵×۲۵، ۴۰×۴۰، ۷۵×۷۵ و ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس مش بندی شد و با توجه به نتایج حاصل از بار کمانشی در جدول (۲) ابعاد المان مناسب ۲۵×۲۵ میلی‌متر انتخاب گردید.

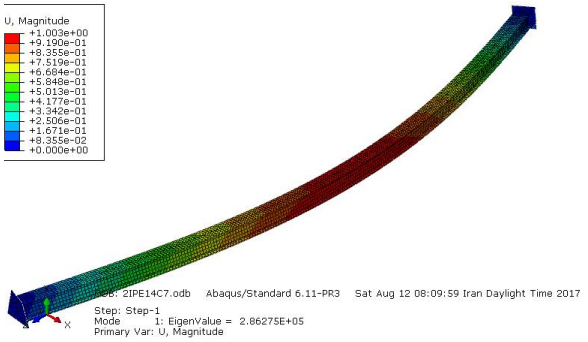
[1] Sahoo D.R., Rai D.C.

[2] Shi G. et. al.

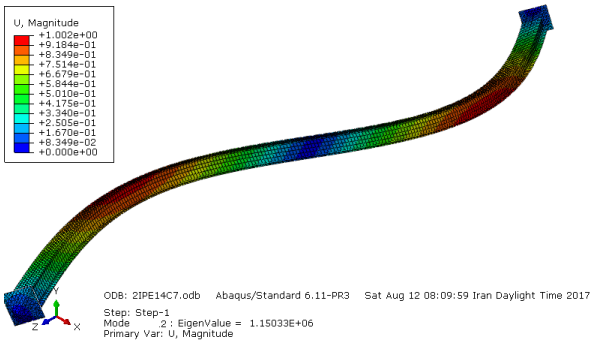
جدول ۲- بار کمانشی 2I140C70 با ابعاد المان غیر یکسان در مقایسه با مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [۱۲]

بار کمانشی مود دوم (نیوتن)	بار کمانشی مود اول (نیوتن)	مقاطع ستون
۱۱۵۰۳۳۰	۲۸۶۲۷۵	2I140C70 ابعاد مش ۲۵×۲۵
۱۱۷۸۲۰۰	۳۰۸۳۹۵	2I140C70 ابعاد مش ۴۰×۴۰
۱۲۳۸۷۳۰	۳۴۶۸۳۹	2I140C70 ابعاد مش ۷۵×۷۵
۱۳۷۲۹۱۸	۳۹۶۳۸۱	2I140C70 ابعاد مش ۱۰۰×۱۰۰
بار کمانشی مود دوم	بار کمانشی مود اول	بار کمانشی 2I140C70 مطابق با مبحث دهم مقررات ملی ساختمان
۱۱۵۵۳۵۳/۴۳۷	۲۸۸۸۳۸/۳۶	2I140C70

در شکل (۲) و (۳) مد اول و دوم کمانشی حاصل از تحلیل عددی ستون 2I140C70 نشان داده شده است.



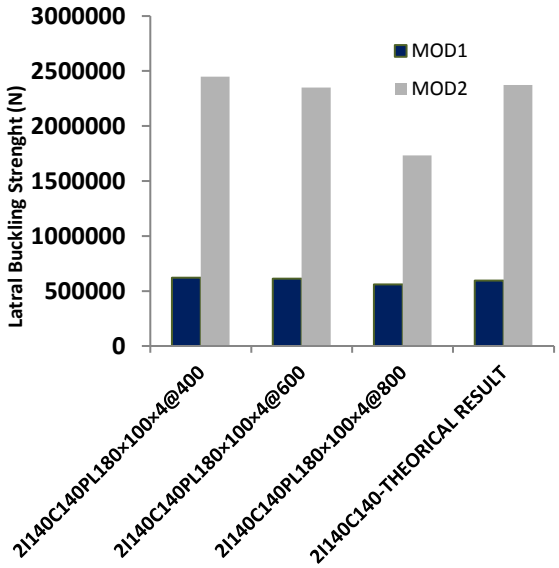
شکل ۲- مد اول کمانشی ستون 2I140C70



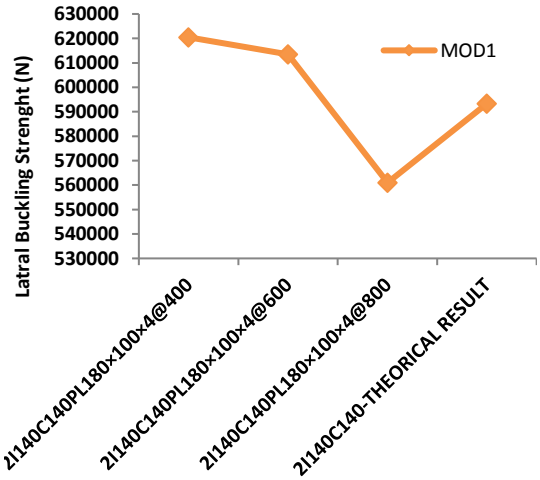
شکل ۳- مد دوم کمانشی ستون 2I140C70

۵- بررسی نتایج مقاطع نردبانی ستون با مقطع IPE140

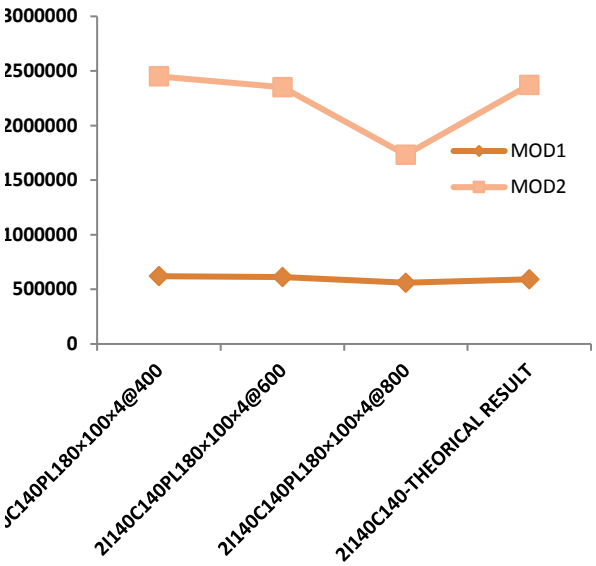
در اشکال (۴) تا (۶) بار کمانشی ناشی از مود اول و دوم مقاطع نردبانی ستون با مقطع دوبل IPE140 و ابعاد بست ۴×۱۰۰×۱۸۰ میلی متر با فواصل بست ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی متر از یکدیگر با ارتفاع ستون ۶ متر در مقایسه با حل تئوری ستون نردبانی مطابق با مبحث نهم مقررات ملی ساختمان آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بار کمانشی ستون با بست‌های با فواصل آکس به آکس ۶۰۰ میلی‌متر از یکدیگر با بار کمانشی حاصل از حل عددی تطابق بیشتری دارد، همچنین با افزایش فواصل بست‌ها بار کمانشی ستون کاهش یافته است.



شکل ۴- نمودار میله ای بار کمانشی ناشی از مود اول و دوم مقاطع نردبانی ستون با مقطع دوبل IPE140 و ابعاد بست ستون با مقطع دوبل IPE140 و ابعاد بست ۴×۱۰۰×۱۸۰ میلی‌متر با فواصل بست ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی متر



شکل ۵- بار کمانشی ناشی از مود اول مقاطع نردبانی ستون با مقطع دوبل IPE140 و ابعاد بست ۴×۱۰۰×۱۸۰ میلی متر با فواصل بست ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی متر



شکل ۶- بار کمانشی ناشی از مود اول و دوم مقاطع نردبانی ستون با مقطع دوبل IPE140 و ابعاد بست ۴×۱۰۰×۱۸۰ میلی متر با فواصل بست ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی متر

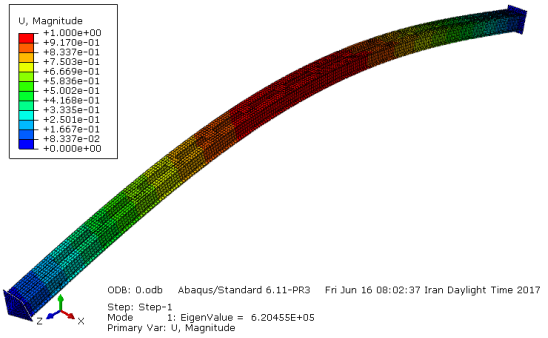
همان‌طور که در اشکال (۴) تا (۶) مشاهده می‌شود بار کمانشی ناشی از مود اول و دوم نوسانی مقاطع نردبانی ستون با مقطع دوبل IPE140 و ابعاد بست ۴×۱۰۰×۱۸۰ میلی‌متر با افزایش فواصل بست‌های موازی از ۴۰۰ میلی‌متر تا ۸۰۰ میلی‌متر بار کمانشی الاستیک ستون کاهش یافته است.

با توجه به جداول (۳) و (۴) بار کمانشی (مود ۱) ستون‌های 2I140C140PL180×100×4@400،2I140C140PL180×100×4@600 و 2I140C140PL180×100×4@800 بترتیب ۳/۲۳٪ بیشتر، ۱٪ کمتر و ۲۷٪ کمتر از بار کمانشی حاصل از حل تئوری ستون نردبانی با مقطع دوبل IPE140 است. این مطلب نشان‌گر آن است که بار کمانشی ستون با مقطع دوبل IPE140 متناسب با بارکمانشی همان ستون با بست PL180×100×4 به فاصله آکس به آکس ۶۰۰ میلی‌متر از هم می باشد.

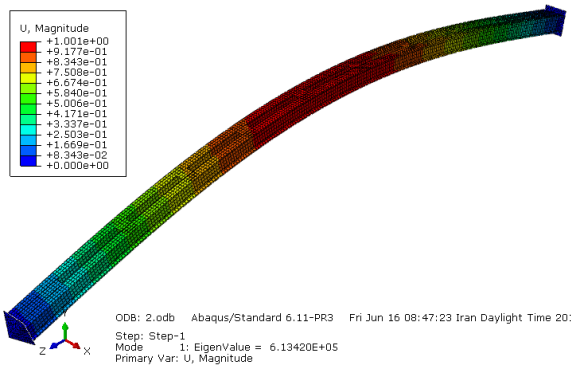
جدول ۳- بار کمانشی ستون های نردبانی با مقطع دوبل IPE140 و بست با ابعاد PL180×100×4 و فواصل ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی متر از یکدیگر

ردیف	نام نمونه	مود ۱ (نیوتن)	مود ۲ (نیوتن)
1	2I140C140PL180×100×4@400	۶۲۰۴۵۵	۲۴۴۹۹۰۰
3	2I140C140PL180×100×4@600	۶۱۳۴۲۰	۲۳۵۰۹۴۰
4	2I140C140PL180×100×4@800	۵۶۰۹۸۱	۱۷۳۲۵۸۰
11	2I140C140-THEORICAL RESULT	۵۹۳۲۷/۷۲	۲۳۷۳۰۹۱

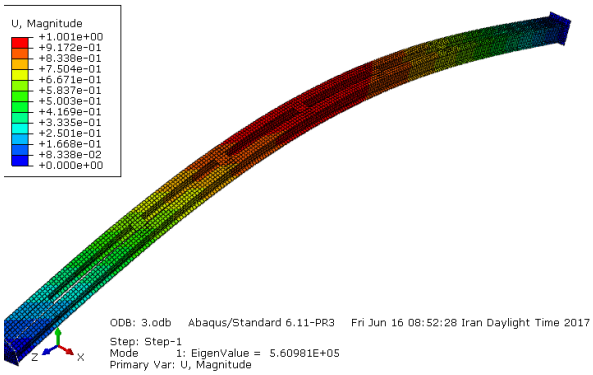
در اشکال (۷) تا (۹) مد اول کمانشی ستون‌های فوق حاصل از تحلیل عددی آورده شده است.



شکل ۷- مد اول کمانشی ستون 2I140C140PL180×100×4@400



شکل ۸- مد اول کمانشی ستون 2I140C140PL180×100×4@600

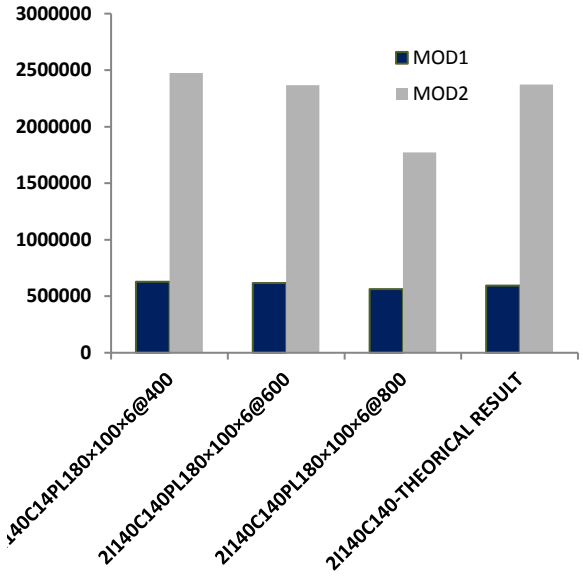


شکل ۹- مد اول کمانشی ستون 2I140C140PL180×100×4@800

جدول ۴- مقایسه بار کمانشی ستون های نردبانی با مقطع دوبل IPE140 و بست با ابعاد PL180×100×4 و فواصل ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی متر از یکدیگر در مقایسه با نتایج حل تئوری

ردیف	نام نمونه	مود ۱ (نیوتن)	$\frac{P_{cr-Abaqus}}{P_{cr-Theorical}}$
1	**2I140C140PL180×100×4@400**	۶۲۰۴۵۵	۱/۰۴۵۸
3	**2I140C140PL180×100×4@600**	۶۱۳۴۲۰	۱/۰۳۳۹
4	**2I140C140PL180×100×4@800**	۵۶۰۹۸۱	۰/۹۴۵
11	2I140C140-THEORICAL RESULT	۵۹۳۲۷۲/۷	۱

در شکل (۱۰) بار کمانشی ناشی از مود اول و دوم مقاطع نردبانی ستون با مقطع دوبل IPE140 و ابعاد بست ۶×۱۰۰×۱۸۰ میلی‌متر با فواصل بست ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی متر از یکدیگر در مقایسه با حل تئوری ستون نردبانی مطابق با مبحث نهم مقررات ملی ساختمان آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بار کمانشی ستون با بست‌های با فواصل آکس به آکس ۶۰۰ میلی‌متر از یکدیگر با بار کمانشی حاصل از حل عددی تطابق بیشتری دارد، همچنین با افزایش فواصل بست‌ها بار کمانشی ستون کاهش یافته است.



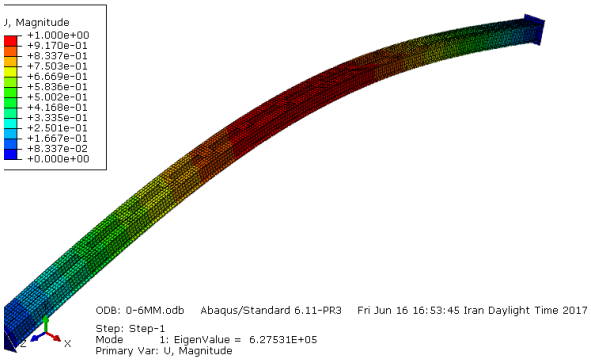
شکل ۱۰- نمودار میله‌ای بار کمانشی ناشی از مود اول و دوم مقاطع نردبانی ستون با مقطع دوبل IPE140 و ابعاد بست ۶×۱۰۰×۱۸۰ میلی متر با فواصل بست ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی متر

همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود بار کمانشی ناشی از مود اول و دوم نوسانی مقاطع نردبانی ستون با مقطع دوبل IPE140 و ابعاد بست ۶×۱۰۰×۱۸۰ میلی‌متر با افزایش فواصل بست‌های موازی از ۴۰۰ میلی‌متر تا ۸۰۰ میلی‌متر بار کمانشی الاستیک ستون کاهش یافته است. با توجه به جداول (۵) و (۶) بار کمانشی (مود ۱) ستون‌های 2I140C140PL180×100×6@400، 2I140C140PL180×100×6@600 و 2I140C140PL180×100×6@800 بترتیب ۵/۷٪ بیشتر، ۴/۱٪ بیشتر و ۵٪ کمتر از بار کمانشی حاصل از حل تئوری ستون نردبانی با مقطع دوبل IPE140 است. این مطلب نشان‌گر آن است که بار کمانشی ستون با مقطع دوبل IPE140 متناسب با بارکمانشی همان ستون با بست PL180×100×6 به فاصله آکس به آکس ۶۰۰ میلی‌متر از هم می‌باشد.

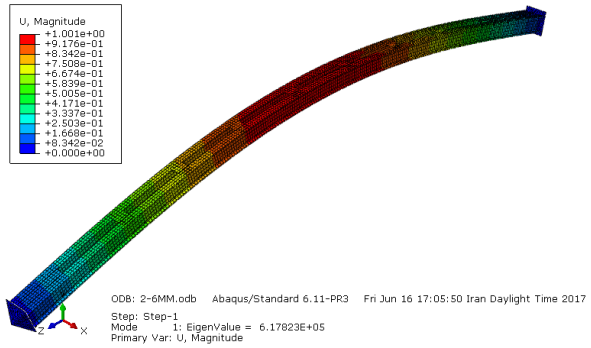
جدول ۵- بار کمانشی ستون‌های نردبانی با مقطع دوبل IPE140 و بست با ابعاد PL180×100×4 و فواصل ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی متر از یکدیگر

نام نمونه	مود ۱ (نیوتن)	مود ۲ (نیوتن)
2I140C140PL180×100×6@400	۶۲۷۵۳۱	۲۴۷۴۸۳۰
2I140C140PL180×100×6@600	۶۱۷۸۲۳	۲۳۶۶۷۴۰
2I140C140PL180×100×6@800	۵۶۴۵۵۶	۱۷۷۲۹۳۰
2I140C140-THEORICAL RESULT	۵۹۳۲۷۲/۷	۲۳۷۳۰۹۱

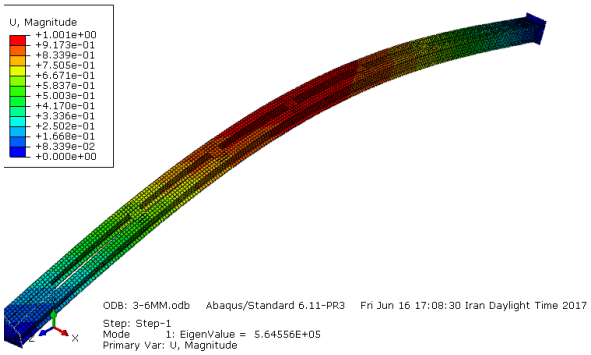
در اشکال (۱۳) تا (۱۵) مد اول کمانشی ستون‌های فوق حاصل از تحلیل عددی آورده شده است.



شکل ۱۳- مد اول کمانشی ستون 2I140C140PL180×100×6@400



شکل ۱۴- مد اول کمانشی ستون 2I140C140PL180×100×6@600



شکل ۱۵-مد اول کمانشی ستون 2I140C140PL180×100×6@800

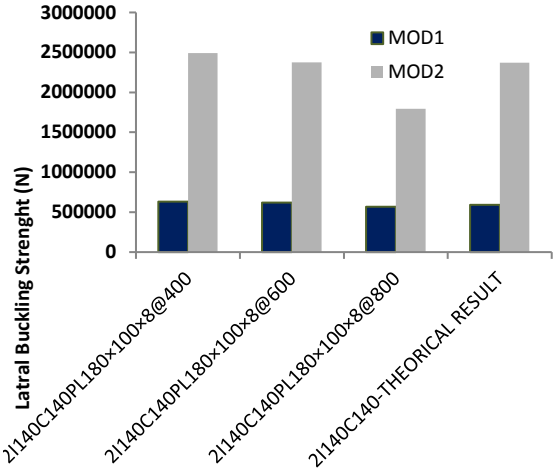
جدول ۶- مقایسه بار کمانشی ستون های نردبانی با مقطع دوبل IPE140 و بست با ابعاد PL180×100×4 و فواصل ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی متر از یکدیگر در مقایسه با نتایج حل تئوری

نام نمونه	مود ۱ (نیوتن)	$\frac{P_{cr-Abaqus}}{P_{cr-Theorical}}$
2I140C140PL180×100×6@400	۶۲۷۵۳۱	۱/۰۵۷
2I140C140PL180×100×6@600	۶۱۷۸۲۳	۱/۰۴۱
2I140C140PL180×100×6@800	۵۶۴۵۵۶	۰/۹۵۱
2I140C140-THEORICAL RESULT	۵۹۳۲۷۲/۷	۱

با مقایسه نتایج جدول (۳) تا (۶) مشخص است که در صورت انتخاب فواصل بست‌ها از یکدیگر به اندازه ۶۰۰ میلی‌متر، جهت بار کمانشی

الاستیک ستون افزایش ضخامت از ۴ میلی‌متر به ۶ میلی‌متر تاثیر چندانی ندارد.

در شکل (۱۶) بار کمانشی ناشی از مود اول و دوم مقاطع نردبانی ستون با مقطع دوبل IPE140 و ابعاد بست ۸×۱۰۰×۱۸۰ میلی متر با فواصل بست ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی متر از یکدیگر در مقایسه با حل تئوری ستون نردبانی مطابق با مبحث نهم مقررات ملی ساختمان آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بار کمانشی ستون با بست های با فواصل آکس به آکس ۶۰۰ میلی‌متر از یکدیگر با بار کمانشی حاصل از حل عددی تطابق بیشتری دارد، همچنین با افزایش فواصل بست‌ها بار کمانشی ستون کاهش یافته است.



شکل ۱۶- نمودار میله ای بار کمانشی ناشی از مود اول و دوم مقاطع نردبانی ستون با مقطع دوبل IPE140 و ابعاد بست ۴×۱۰۰×۱۸۰ میلی متر با فواصل بست ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی متر

همان‌طور که در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود بار کمانشی ناشی از مود اول و دوم نوسانی مقاطع نردبانی ستون با مقطع دوبل IPE140 و ابعاد بست ۶×۱۰۰×۱۸۰ میلی‌متر با افزایش فواصل بست‌های موازی از ۴۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر بار کمانشی الاستیک ستون کاهش یافته است. با توجه به جداول (۷) و (۸) بار کمانشی (مود ۱) ستون‌های 2I140C140PL180×100×8@400، 2I140C140PL180×100×8@600 و 2I140C140PL180×100×8@800 بترتیب ۶/۵٪ بیشتر، ۴/۶٪ بیشتر و ۴/۵٪ کمتر از بار کمانشی حاصل از حل تئوری ستون نردبانی با مقطع دوبل IPE140 است. این مطلب نشان‌گر آن است که بار کمانشی ستون با مقطع دوبل IPE140 متناسب با بارکمانشی همان ستون با بست PL180×100×8 به فاصله آکس به آکس ۶۰۰ میلی‌متر از هم می‌باشد. نکته حائز اهمیت آن است که بار کمانشی (مود) در ستون با بست‌های موازی و با ضخامت ۸ میلی‌متر و فواصل آکس به آکس ۶۰۰ میلی‌متر از یکدیگر نیز بیشتر از بار کمانشی ستون نردبانی حاصل از حل تئوری می‌باشد.

جدول ۷- بار کمانشی ستون های نردبانی با مقطع دوبل IPE140 و بست با ابعاد PL180×100×4 و فواصل ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی متر از یکدیگر

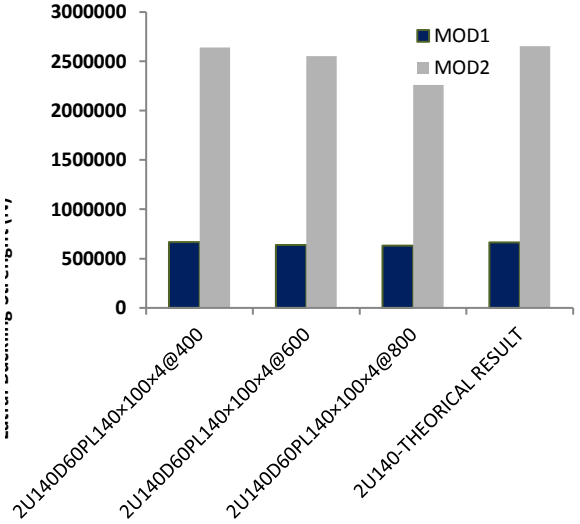
نام نمونه	مود ۱ (نیوتن)	مود ۲ (نیوتن)
2I140C140PL180×100×8@400	۶۳۱۹۵۵	۲۴۹۰۲۳۰
2I140C140PL180×100×8@600	۶۵۰۵۶۷	۲۳۷۶۲۰۰
2I140C140PL180×100×8@800	۵۶۶۷۸۷	۱۷۹۵۴۰۰
2I140C140-THEORICAL RESULT	۵۹۳۲۷۲/۷	۲۳۷۳۰۹۱

جدول ۸- مقایسه بار کمانشی ستون‌های نردبانی با مقطع دوبل IPE140 و بست با ابعاد PL180×100×4 و فواصل ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی متر از یکدیگر در مقایسه با نتایج حل تئوری

نام نمونه	مود ۱ (نیوتن)	$\frac{p_{cr-Abaqus}}{p_{cr-Theorical}}$
2I140C140PL180×100×8@400	۶۳۱۹۵۵	۱/۰۶۵
2I140C140PL180×100×8@600	۶۵۰۵۶۷	۱/۰۴۶
2I140C140PL180×100×8@800	۵۶۶۷۸۷	۰/۹۵۵
2I140C140-THEORICAL RESULT	۵۹۳۲۷۲/۷	۱

۶- بررسی نتایج مقاطع نردبانی ستون با مقطع UNP140

در شکل (۱۷) بار کمانشی ناشی از مود اول و دوم مقاطع نردبانی ستون با مقطع دوبل UNP140 و ابعاد بست ۴×۱۰۰×۱۴۰ میلی‌متر با فواصل بست ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر از یکدیگر و ارتفاع ۶ متر در مقایسه با حل تئوری ستون نردبانی مطابق با مبحث نهم مقررات ملی ساختمان آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بار کمانشی ستون با بست‌های با فواصل آکس به آکس ۴۰۰ میلی‌متر از یکدیگر با بار کمانشی حاصل از حل عددی تطابق بیشتری دارد، همچنین با افزایش فواصل بست‌ها بار کمانشی ستون کاهش یافته است.



شکل ۱۷- نمودار میله‌ای بار کمانشی ناشی از مود اول و دوم مقاطع نردبانی ستون با مقطع دوبل UNP140 و ابعاد بست ۴×۱۰۰×۱۴۰ میلی‌متر با فواصل بست ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی متر

همانطور که در شکل (۱۷) مشاهده می‌شود بار کمانشی ناشی از مود اول و دوم نوسانی مقاطع نردبانی ستون با مقطع دوبل UNP140 و ابعاد بست ۴×۱۰۰×۱۴۰ میلی‌متر با افزایش فواصل بست‌های موازی از ۴۰۰ میلی‌متر تا ۸۰۰ میلی‌متر بار کمانشی الاستیک ستون کاهش یافته است.

با توجه به جداول (۹) و (۱۰) بار کمانشی (مود ۱) ستون‌های 2U140D60PL140×100×4@400، 2U140D60PL140×100×4@600 و 2U140D60PL140×100×4@800 بترتیب ۰/۷٪ بیشتر، ۴٪ کمتر و ۵/۷٪ کمتر از بار کمانشی الاستیک حاصل از حل تئوری ستون نردبانی با مقطع دوبل UNP140 است. این مطلب نشان‌گر آن است که بار کمانشی ستون با مقطع دوبل UNP140 متناسب با بارکمانشی همان ستون با بست PL140×100×4 به فاصله آکس به آکس ۴۰۰ میلی-متر از هم می‌باشد.

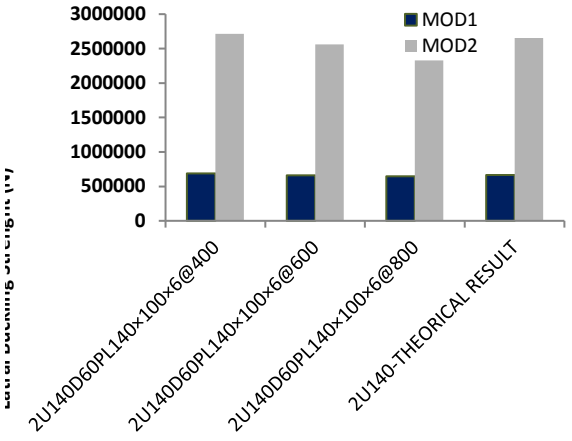
جدول ۹- بار کمانشی ستون های نردبانی با مقطع دوبل UNP140 و بست با ابعاد PL140×100×4 و فواصل ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر از یکدیگر

نام نمونه	مود ۱ (نیوتن)	مود ۲ (نیوتن)
2U140D60PL140×100×4@400	۶۶۸۲۵۲/۴	۲۶۴۱۵۳۶
2U140 D60PL140×100×4@600	۶۳۶۹۲۱/۶	۲۵۵۴۸۶۰
2U140 D60PL140×100×4@800	۶۳۲۴۹۹/۶	۲۲۶۱۰۱۶
2U140 D60-THEORICAL RESULT	۶۶۳۴۵۶/۳۷	۲۶۵۳۸۲۵/۵۱

جدول ۱۰- مقایسه بار کمانشی ستون‌های نردبانی با مقطع دوبل UNP140 و بست با ابعاد PL140×100×4 و فواصل ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر از یکدیگر در مقایسه با نتایج حل تئوری

نام نمونه	مود ۱ (نیوتن)	$\frac{p_{cr-Abaqus}}{p_{cr-Theorical}}$
2U140D60PL180×100×4@400	۶۶۸۲۵۲/۴	۱/۰۰۷
2U140D60PL180×100×4@600	۶۳۶۹۲۱/۶	۰/۹۶
2U140D60PL180×100×4@800	۶۳۲۴۹۹/۶	۰/۹۵۳
2U140D60-THEORICAL RESULT	۶۶۳۴۵۶/۳۷	۱

در شکل (۱۸) بار کمانشی ناشی از مود اول و دوم مقاطع نردبانی ستون با مقطع دوبل UNP140 و ابعاد بست ۶×۱۰۰×۱۴۰ میلی‌متر با فواصل بست ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی متر از یکدیگر در مقایسه با حل تئوری ستون نردبانی مطابق با مبحث نهم مقررات ملی ساختمان آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بار کمانشی ستون با بست های با فواصل آکس به آکس ۴۰۰ میلی‌متر از یکدیگر با بار کمانشی حاصل از حل عددی تطابق بیشتری دارد، همچنین با افزایش فواصل بست‌ها بار کمانشی ستون کاهش یافته است.



شکل ۱۸- نمودار میله ای بار کمانشی ناشی از مود اول و دوم مقاطع نردبانی ستون با مقطع دوبل UNP140 و ابعاد بست ۶×۱۰۰×۱۴۰ میلی متر با فواصل بست ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی متر

همان‌طور که در اشکال ۴-۲۱ الی ۴-۲۳ مشاهده می‌شود بار کمانشی ناشی از مود اول و دوم نوسانی مقاطع نردبانی ستون با مقطع دوبل UNP140 و ابعاد بست ۶×۱۰۰×۱۸۰ میلی‌متر با افزایش فواصل بست‌های موازی از ۴۰۰ میلی‌متر تا ۸۰۰ میلی‌متر بار کمانشی الاستیک ستون کاهش یافته است.

با توجه به جداول (۱۱) و (۱۲) بار کمانشی (مود ۱) ستون‌های 2U140D60PL140×100×6@400، 2U140D60PL140×100×6@600 و 2U140D60PL140×100×6@800 بترتیب ۳/۶٪ بیشتر، ۱٪ کمتر و ۲/۵٪ کمتر از بار کمانشی حاصل از حل تئوری ستون نردبانی با مقطع دوبل UNP140 است. این مطلب نشان‌گر آن است که بار کمانشی ستون با مقطع دوبل UNP140 متناسب با بارکمانشی همان ستون با بست PL140×100×6 به فاصله آکس به آکس ۴۰۰ میلی-متر از هم می‌باشد.

جدول ۱۱- بار کمانشی ستون های نردبانی با مقطع دوبل UNP140 و بست با ابعاد PL140×100×4 و فواصل ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی متر از یکدیگر

نام نمونه	مود ۱ (نیوتن)	مود ۲ (نیوتن)
2U140D60PL140×100×6@400	۶۸۷۶۰۸/۴	۲۷۱۴۵۹۲
2U140D60PL140×100×6@600	۶۵۸۳۲۹/۶	۲۵۶۲۹۹۶
2U140D60PL140×100×6@800	۶۴۶۹۸۶	۲۳۲۷۷۸۴
2U140D60-THEORICAL RESULT	۶۶۳۴۵۴/۳۷	۲۶۵۳۸۲۵/۵

جدول ۱۲- مقایسه بار کمانشی ستون های نردبانی با مقطع دوبل UNP140 و بست با ابعاد PL140×100×4 و فواصل ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی متر از یکدیگر در مقایسه با نتایج حل تئوری

نام نمونه	مود ۱ (نیوتن)	$\frac{p_{cr-Abaqus}}{p_{cr-Theorical}}$
2U140D60PL140×100×6@400	۶۸۷۶۰۸/۴	۱/۰۳۶
2U140D60PL140×100×6@600	۶۵۸۳۲۹/۶	۰/۹۹۲
2U140D60PL140×100×6@800	۶۴۶۹۸۶	۰/۹۷۵
2U140D60-THEORICAL RESULT	۶۶۳۴۵۴/۳۷	۱

۷- نتیجه گیری

۱- نتایج حاصل از تحلیل عددی ستون دوبل IPE140 بهم چسبیده تطابق خیلی خوبی با روابط تحلیلی مبحث دهم مقررات ملی ساختمان دارد.

۲- بار کمانشی ناشی از مود اول و دوم نوسانی مقاطع نردبانی ستون با مقطع دوبل IPE140 و ابعاد بست ۴×۱۰۰×۱۸۰ میلی‌متر با افزایش فواصل بست‌های موازی از ۴۰۰ میلی‌متر تا ۸۰۰ میلی‌متر بار کمانشی الاستیک ستون کاهش یافته است.

۳- بار کمانشی (مود ۱) ستون‌های 2I140C140PL180×100×4@400، 2I140C140PL180×100×4@600 و 2I140C140PL180×100×4@800 بترتیب ۳/۲۳٪ بیشتر، ۱٪ کمتر و ۲۷٪ کمتر از بار کمانشی حاصل از حل تئوری ستون نردبانی با مقطع دوبل IPE140 است.

۴- بار کمانشی ستون با مقطع دوبل IPE140 حاصل از روابط مبحث دهم مقررات ملی ساختمان متناسب با بارکمانشی همان ستون با بست PL180×100×4 به فاصله آکس به آکس ۶۰۰ میلی‌متر از هم می باشد.

۵- بار کمانشی (مود ۱) ستون‌های 2I140C140PL180×100×6@400، 2I140C140PL180×100×6@600 و 2I140C140PL180×100×6@800 بترتیب ۵/۷٪ بیشتر، ۴/۱٪ بیشتر و ۵٪ کمتر از بار کمانشی حاصل از حل تئوری ستون نردبانی با مقطع دوبل IPE140 است.

۶- بار کمانشی ستون با مقطع دوبل IPE140 حاصل از روابط مبحث دهم مقررات ملی ساختمان متناسب با بارکمانشی همان ستون با بست PL180×100×6 به فاصله آکس به آکس ۶۰۰ میلی‌متر از هم می باشد.

۷- بار کمانشی ناشی از مود اول و دوم مقاطع نردبانی ستون با مقطع دوبل UNP140 و ابعاد بست ۴×۱۰۰×۱۴۰ میلی متر با فواصل بست ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی متر از یکدیگر و ارتفاع ۶ متر در مقایسه با حل تئوری ستون نردبانی مطابق با مبحث نهم مقررات ملی ساختمان متناسب است.

۸- بار کمانشی (مود ۱) ستون‌های 2I140D60PL140×100×4@400، 2I140D60PL140×100×4@600 و 2I140D60PL140×100×4@800 بترتیب ۰/۷٪ بیشتر، ۴٪ کمتر و ۵/۷٪ کمتر از بار کمانشی الاستیک حاصل از حل تئوری ستون نردبانی با مقطع دوبل UNP140 است.

۹- بار کمانشی ستون با مقطع دوبل UNP140 متناسب با بارکمانشی همان ستون با بست PL140×100×4 به فاصله آکس به آکس ۴۰۰ میلی‌متر از هم می‌باشد.

۱۰- بار کمانشی (مود ۱) ستون‌های 2U140D60PL140×100×6@400، 2U140D60PL140×100×6@600 و 2U140D60PL140×100×6@800 بترتیب ۳/۶٪ بیشتر، ۱٪ کمتر و ۲/۵٪ کمتر از بار کمانشی حاصل از حل تئوری ستون نردبانی با مقطع دوبل UNP140 است. این مطلب نشان‌گر آن است که بار کمانشی ستون با مقطع دوبل UNP140 متناسب با بارکمانشی همان ستون با بست PL140×100×6 به فاصله آکس به آکس ۴۰۰ میلی‌متر از هم می‌باشد.

۷- منابع و مراجع

[1] Schafer B.W., Adany S., "Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods", 18 th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, Orlando, Florida, 2006.

[2] قبادی، محمد سهیل، قاسمیه، مهدی، مزروعی، علی، بررسی رفتار غیرخطی ستون‌های مرکب مزدوج I شکل در سازههای فولادی رایج، نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری، ۱۳۸۹، ۵۱۳-۵۲۳.

[3] Chen J.K., Li L.Y., "Elastic axially compressed buckling of battened columns", International Journal of Mechanical Sciences 77, 2013, 1–7.

[4] Dabaon M., Ellobody E., Ramzy K., "Experimental investigation of built-up cold-formed steel section battened columns", Thin-Walled Structures, 2015, 137–145.

[5] ElAghoury M.A., Salem A.H., Hanna M.T., Amoush E.A., "Strength of cold formed battened columns subjected to eccentric axial compressive force", Journal of Constructional Steel Research, 2015, 58–70.

[6] Hosseini Hashemi B., jafari S.M., "Experimental of Cyclic Behavior of Batten Column", Journal of Constructional Steel Research, 2012, 88-96.

[7] Javidinejad A., Aerospace Z., "Buckling Of Beams And Columns Under Combined Axial And Horizontal Loading With Vrious Axial Loading Application Locations", Theoretical And Applied Mechanics, Sofia, 2012, vol. 42, No. 4, pp. 19–30.

[8] Sahoo D.R., Rai D.C., "Built-up battened columns under lateral cyclic loading", Thin-Walled Structures, 2007, 552–562.

[9] Shi G., Zhou W., Bai Y., Lin C., "Local buckling of 460 MPa high strength steel welded section stub columns under axial compression", Journal of Constructional Steel Research, 2014, 60–70.

[10] Abaqus Analisys User's Manual, Version 6.11, 2010.

[11]جی. ان. ردی.، ۱۳۸۷،" مقدمه ای بر روش اجزای محدود "، سلطانی، ن.، راستگو، ع.،انتشارات دانشگاه تهران، چاپ دوم.

[12] دفتر امور مقررات ملی ساختمانی ایران،۱۳۹۲، مقررات طرح و اجرای ساختمان های فولادی"مبحث دهم"، نشر توسعه ایران.

Investigation of the Girth Size and intervals Effect on Lateral Buckling Strength of Built-up Double I & C-Sections Columns

Jaber Hemayati
Graduate Student, Department of Civil Engineering, Bandar Abbas Branch, Islamic Azad University, Bandar Abbas, Iran.
Ahmad Rahbar Ranji
Associate Professor of the Faculty of Engineering, Amir Kabir University of Technology.

Abstract:

Steel composite columns with parallel girth are one of the common types of columns used in steel structures in the country (IRAN). Despite many studies on the behavior of these columns, the impact dimensions and spacing of girth on the buckling load of these columns have been less considered. In addition to resistance criteria, in designing of pressure members, the stability criteria must also be considered. In other words, the pressure members of a structure will be defeated effectively by local buckling before reaching maximum compressive strength or influence of buckling phenomenon. The local buckling is one of the common instability of structural members and is an important factor in design of the Built-up columns, so the buckling phenomenon of these columns must be strongly controlled. In this research, 10 columns by double I sections and 6 columns by double C sections were analyzed by different intervals of girths. All column sections are double IPE140 or UNP140. Dimensions of the girth in double I sections are 100×180 mm, with thickness of 4, 6 and 8 mm, by intervals axes to axes 400, 600 and 800 mm in both side. Dimensions of the girth in double C sections are 100×140 mm, with thickness of 4 and 6 mm, by intervals axes to axes 400, 600 and 800 mm in both side. Finally, the elastic buckling load of these columns was obtained by using the Abacus finite element software and compared with the relationships in the tenth chapter of the National Building Regulations.

Keywords: numerical analysis, ladder pillar, clamp, lateral buckling.