

بررسی تأثیر مدول مماسی در ناحیه کار-سختی منحنی تنش- کرنش روی شکل پذیری ستون های لوله ای از جنس فولاد ضد زنگ

علیرضا نظری^{۱*}، امیرحسین کریمی^۱

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران

arnazari@tvu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۳/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۳۰

چکیده

با توجه به مفهوم شکل پذیری اجزای سازه ای در ارتباط با ظرفیت حفظ پایداری پس از تجربه ناحیه خمیری در ماده، تأثیر تغییر مدول مماسی ماده در ناحیه کار-سختی در تعیین ظرفیت باربری پس از کماتش ستون های لوله ای از جنس فولاد ضد زنگ مورد توجه قرار گرفت. با توجه به هزینه کمتر مطالعات عددی نسبت به مطالعات آزمایشگاهی در رابطه با موضوع، روش تحقیق بر مبنای تهیه مدل های المان محدود انتخاب شده و روش مدل سازی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در مورد یک نمونه ستون لوله ای از جنس فولاد ضد زنگ با $D/t=60$ مورد تصدیق قرار گرفته که بدین منظور رفتار غیرخطی در مصالح و هندسه در مدل ملاحظه شد. در ادامه مدل های المان محدود برای نسبت های مختلف D/t توسعه داده شده که طبق نتایج بدست آمده، دو پارامتر مهم در مورد شکل پذیری ستون ها شامل اولاً، ظرفیت جذب انرژی و ثانیاً، نسبت تغییر شکل ستون در آستانه فروریزش به تغییر شکل در لحظه تسلیم مقطع (e/g) در نتیجه افزایش نسبت قطر به ضخامت در ستون ها، با افزایش چشمگیری مشاهده شد، به عنوان نمونه جذب انرژی و e/g در ستون $D/t=30$ نسبت به ستون $D/t=60$ به ترتیب حدود ۳۵٪ و ۱۱۱٪ افزایش پیدا کرد. دو مدل مذکور برای بررسی تأثیر تغییر مدول مماسی در ناحیه کار-سختی انتخاب شده و تأثیر مدول مماسی در دو بخش مقدم و مؤخر روی پارامترهای مربوط به میزان شکل پذیری ستون ها ملاحظه شد. طبق نتایج بدست آمده، افزایش مدول مماسی ماده در بخش مقدم کار-سختی دارای تأثیر مهم روی ظرفیت شکل پذیری ستون ها با نسبت D/t متوسط، حال آنکه مدول مماسی در بخش مؤخر کار-سختی دارای تأثیر مهم در مورد ستون ها با نسبت D/t کمتر بود. با افزایش دو برابری مدول مماسی در بخش مؤخر کار-سختی، جذب انرژی و نسبت e/g در ستون $D/t=30$ به ترتیب به اندازه ۱۱۱٪ و ۷۱٪ نسبت به حالتی که برای همین ستون ماده آزمایشگاهی ملاحظه شده بود افزایش پیدا کرد حال آنکه در مورد ستون $D/t=60$ با افزایش دو برابری مدول مماسی در بخش مقدم کار-سختی، دو پارامتر یاد شده به ترتیب به اندازه ۲۶٪ و ۴۶٪ افزایش پیدا کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که برای داشتن رفتار شکل پذیری بیشتر برای ستون ها، می توان با طراحی ترکیب شیمیایی مناسب برای مصالحی مانند فولاد ضد زنگ، بخش کار-سختی را با توجه به اندازه قطر به ضخامت ستون ها بهینه سازی کرده و از مزایای شکل پذیری بیشتر برخوردار بود.

واژه های کلیدی: شکل پذیری؛ مدول مماسی؛ کماتش؛ ستون لوله ای؛ رفتار کار-سختی؛ فولاد ضد زنگ.

مقدمه

با توجه به مزایای کماتش پلاستیک در ستون‌های فولادی، آیین‌نامه‌ها توصیه‌هایی برای طراحی مقطع ستون‌ها برای وارد شدن در ناحیه پلاستیک در نظر گرفته‌اند که نمونه‌ای از این آیین‌نامه‌ها FEMA 356 [1] است که نمودار بار-تغییر شکل (P- Δ) شماتیک به صورت شکل (۱) معرفی شده و برای اعضای اصلی سازه در صورتی که نسبت $e/g > 2$ باشد عضو را تحت کنترل تغییر شکل (شکل‌پذیر و دارای رفتار مطلوب در برابر بار زلزله) و در غیر این صورت، تحت کنترل نیرو (غیر شکل‌پذیر) طبقه‌بندی کرده است.

شکل ۱. منحنی شماتیک رفتار نیرو-تغییر شکل عضو سازه‌ای.

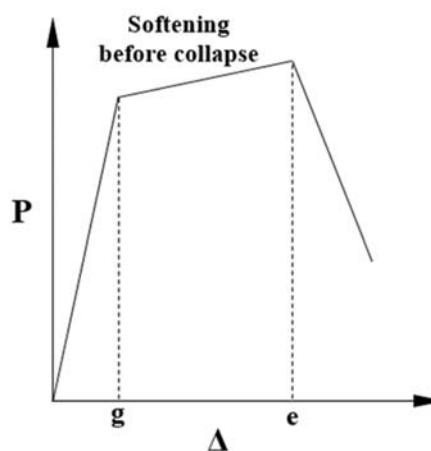


Fig. 1. Schematic force-deformation curve for a structural member.

با توجه به معمولاً جدارنازک بودن مقاطع فولادی مورد استفاده بعنوان پروفیل‌های سازه‌ای، با کاربرد این اعضا بصورت جداربسته، ظرفیت بار کماتشی آن‌ها به مراتب افزایش یافته و به علاوه اینکه در مقاطع لوله‌ای، مقطع در برابر کماتش در همه جهات به صورت بهینه عمل می‌کند. پارامترهای مؤثر در ستون‌های فولادی در برابر کماتش، نسبت طول به قطر (L/D) و نسبت قطر به ضخامت (D/t) است حال آنکه در کماتش کاملاً پلاستیک، تنها پارامتر مؤثر، نسبت D/t است و از آنجا که کماتش پلاستیک پس از تسلیم مقطع اتفاق می‌افتد، ظرفیت باربری و میزان شکل‌پذیری ستون وابسته به ظرفیت سطح مقطع

آن در بهره‌گیری از ظرفیت ماده پس از نقطه تسلیم به نام ظرفیت کار-سختی می‌باشد [1].

با توجه به رایج بودن استفاده از مقاطع فولادی لوله‌ای در سازه‌های مختلف ساختمانی و صنعتی، تحقیق زیادی روی رفتار این اعضا با تغییر ابعاد آن‌ها انجام شده است، حال آنکه تمرکز تحقیق حاضر بررسی رفتار پس از تسلیم این مقاطع با تغییر نسبت D/t در ابعاد و مقدار دانسته جذب انرژی ویژه با تغییر مدول مماسی ماده مربوط به بخش کار-سختی منحنی تنش-کرنش می‌باشد. امروزه، پژوهشگران صرف‌نظر کردن از ظرفیت کار-سختی ماده را در ارزیابی میزان باربری ستون‌های لوله‌ای مقرون به صرفه ندانسته و تحلیل عملکرد سازه را با توجه به رفتار پس از تسلیم مواد منطقی‌تر می‌دانند [2].

حال آنکه تاکنون بررسی جامع و اهمیت نواحی مختلف منحنی تنش-کرنش آلیاژهای مختلف فلزات پس از تسلیم کمتر مورد توجه تحقیقات قرار گرفته است به این معنی که الگویی جامع برای تعیین رفتار بهینه پس از تسلیم برای دستیابی به ظرفیت بیشتر در باربری پلاستیک اعضا ارائه نشده است. از آنجا که رفتار پس از تسلیم فلزات وابسته به ترکیب شیمیایی می‌باشد می‌توان با طراحی مناسب ترکیب شیمیایی، رفتاری بهینه برای عملکرد ستون‌ها در زمان کماتش پلاستیک به دست آورد.

ملاحظه قابلیت‌های فولاد ضدزنگ از نظر مشخصات مکانیکی و مقاومت در برابر خوردگی، علاقه مهندسین و پژوهشگران را برای شناخت بهتر این خواص و فرصت‌های کاربرد اجزای سازه‌ای از جنس فولاد ضد زنگ جلب کرده است [3]. در این راستا تحقیقات متنوعی در مورد عملکرد اجزای سازه‌ای شکل‌دهی شده به صورت سرد و یا گرم بعنوان المان‌های سازه‌ای مثل تیر ستون‌ها از جنس فولاد ضدزنگ انجام شده است که به عنوان مثال وندنبرگ [4] با هدف وارد کردن روابطی مرتبط با ظرفیت مقاومت ماده پس از تسلیم در آیین‌نامه‌های طراحی قابل استناد برای تعیین ظرفیت باربری ستون‌های لوله‌ای از جنس فولاد ضدزنگ، نمونه‌های متعددی را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داد. با توجه به امکان استفاده از ظرفیت کار-سختی ماده در ستون‌ها تنها در صورت وقوع کماتش پلاستیک، مطالعات مرتبط با کماتش پلاستیک

همچنین رفتار ستون‌های لوله‌ای تحت بارگذاری چرخه‌ای شامل روند کاهش سختی و جذب انرژی این اعضا توسط لئون و همکاران [21] بررسی شده است. شی و همکاران [22] مدل رفتاری الاستوپلاستیک برای تخمین ظرفیت باربری اعضای فولادی ضدزنگ با تغییر مقاومت نهایی ماده ارائه دادند که در آن دو نوع سخت‌شوندگی ملاحظه شده و در مدل‌های المان محدود وارد شده بود. از دیگر موضوعات مورد توجه در مورد رفتار باربری ستون‌های لوله‌ای، تاثیر انواع نقص در باربری این اجزا بوده است. اکرمی و همکاران [23] ظرفیت باربری ستون‌های لوله‌ای فولادی آسیب‌دیده را در اثر برخورد خارجی برای پارامترهای عمق و موقعیت آسیب و اندازه جسم برخوردکننده برای نسبت‌های مختلف لاغری ستون برآورد و رفتار پس از کمانش را در این ستون‌ها مطالعه کردند. تاجداری و همکاران [24] کمانش پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک فولادی را با وجود بازشوهایی در جداره این اعضا ملاحظه کردند.

در بخش ابتدایی تحقیق حاضر، روش مدل‌سازی المان محدود در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی بدست‌آمده برای یک نسبت ابعاد از ستون‌های لوله‌ای از جنس فولاد ضدزنگ (با توجه به کفایت یک نسبت ابعاد برای تصدیق مدل‌سازی برای بررسی تاثیر تغییرات رفتار تنش-کرنش در ستون‌های لوله‌ای) مورد راستی‌آزمایی قرار گرفته و رفتار کمانش پلاستیک برای نسبت‌های مختلف D/t در ستون‌های لوله‌ای بدست آمد. در ادامه مدول مماسی ناحیه کار-سختی منحنی تنش-کرنش در فولاد ضدزنگ مورد آزمایش، بر روی دو نمونه از مدل‌های المان محدود مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن میزان افزایش شکل‌پذیری را برای هر یک از ستون‌ها به ازای میزان مشخصی از افزایش مدول مماسی در بخش‌های مختلف منحنی تنش-کرنش نشان می‌دهد.

۲- برنامه مطالعه آزمایشگاهی

با توجه به اینکه هدف از تحقیق حاضر، بررسی تاثیر تغییرات در ناحیه پس از تسلیم منحنی تنش-کرنش آلیاژهای فولاد بود و از طرفی با توجه به ظرفیت بالای آلیاژهای فولاد ضدزنگ

ستون‌ها نیز که غالباً مربوط به ستون‌های دارای سطح مقطع جداربسته می‌باشد اهمیت می‌یابد. از تحقیقات اولیه در این زمینه، آبرامویچ و جونز [5, 6] برای پیش‌بینی رفتار کمانش پلاستیک و انرژی جذب‌شده توسط ستون‌های جدارنازک با مقطع دایروی و مربعی در جریان فروریزش، مدلی ساده شامل تعدادی مفاصل پلاستیک بر روی یک مقطع طولی از ستون پیشنهاد کرده و معادلات تعادل دینامیکی را برای تخمین ظرفیت باربری این ستون‌ها توسعه دادند. تورگارد [7] احتمال تغییر شکل کمانش بصورت متقارن و یا غیرمتقارن را برای ستون‌های لوله‌ای با جدار نسبتاً ضخیم بررسی کرده و تبدیل شکل کمانش را وابسته به نسبت قطر به ضخامت (D/t) برای ستون‌ها نشان دادند. گوپتا و همکاران [8, 9] سازوکار فروریزش در ستون‌های لوله‌ای را مورد تحلیل قرار داده و توزیع تنش در محل‌های تاخوردگی را در جریان فروریزش ارائه دادند. گاردنر و همکاران [10-12] تاثیر افزایش رفتار کار-سختی را در ظرفیت باربری ستون‌های لوله‌ای ملاحظه کرده و روشی به نام روش مقاومت مستقیم را برای پیش‌بینی تاثیر رفتار کار-سختی در ظرفیت باربری ستون‌ها پایه گذاری کردند. هوآنگ و یانگ [13] نشان دادند که کاهش ضریب لاغری موجب افزایش ظرفیت باربری در ستون‌های جدارنازک با مقطع مربعی از جنس فولاد ضدزنگ بوده و مقاومت نهایی ستون‌ها را با مقادیر پیش‌بینی شده بر اساس روش مقاومت مستقیم مقایسه کردند. در تحقیقات متعددی روی اجزای ستون‌ها و تیرستون‌های دارای مقاطع جداربسته، معیارهای طراحی این اجزا بازبینی شده [14, 15]، که به عنوان نمونه جیندرا و همکاران [16] رفتار کمانش خمشی در ستون‌های با مقطع دایروی از جنس فولاد ضدزنگ را توسط مدل‌های المان محدود با وارد کردن آثار رفتار غیرخطی در هندسه و ماده بررسی کرده و سعی به اصلاح منحنی پیش‌بینی کمانش ستون‌ها کردند که قابل ارائه در آئین‌نامه‌های طرایی بود. با توجه به اهمیت رفتار غیرخطی مواد در برابر افزایش حرارت و به عنوان مثال آتش‌سوزی، اخیراً تحقیقات متعددی روی رفتار باربری نهایی این اعضا در معرض آتش متمرکز شده است [17-20].

مختلف منحنی به سه قسمت شامل رفتار با مدول الاستیسته اولیه E_0 ، رفتار با مدول مماسی کار-سختی مقدم E_{sh} و رفتار با مدول مماسی مؤخر E_u تقسیم شد که مقادیر این مدول‌ها و تنش در نقاط ابتدا و انتهای هر قسمت روی منحنی مشخص شده است. برای انجام آزمایش فشاری نمونه‌ها بین دو ورق ضخیم، یکی در پایین به صورت ثابت و ورق دیگر در بالا با سرعت حرکت عمودی برابر 5 mm/s در نظر گرفته شده و دستگاه، بار وارد شده به نمونه و میزان نزدیک شدن دو صفحه را که برابر با تغییر شکل ستون بود ثبت کرد. پس از شروع آزمایش، نمونه تحت تغییر شکل محوری قرار گرفت که میزان تغییر شکل در ناحیه الاستیک محسوس نبود حال آنکه پس از وارد شدن ستون در ناحیه پس از تسلیم، تغییر شکل محوری قابل توجه بود تا زمانی که بخشی از ناحیه انتهایی ستون به سمت بیرون منحرف شده (با مود کمانش پافیلی^۲) و افت منحنی باربری اتفاق افتاد که توضیح آن به صورت مفصل‌تری در بخش بحث روی نتایج ارائه می‌شود.

در ناحیه پس از تسلیم، نمونه‌ای از فولاد ضدزنگ دوپلکس^۱ برای آزمایش انتخاب شد که با توجه به هدف مقاله در بررسی تأثیر تغییرات رفتار تنش-کرنش و عدم تأثیر نسبت‌های مختلف L/D در رفتار کمانش پلاستیک ستون‌های لوله‌ای، ملاحظه یک نسبت ابعاد برای تصدیق مدل‌های عددی بکار گرفته شده کفایت کرد. اندازه ستون فولادی مورد بررسی با هدف هدایت ستون برای کمانش پلاستیک و رفع احتمال کمانش با مود اولری با اندازه طول، قطر و ضخامت به ترتیب برابر $L=300 \text{ mm}$ ، $D=60 \text{ mm}$ و $t=1 \text{ mm}$ انتخاب شد. برای اطمینان از درستی نتایج، سه نمونه تحت آزمایش فشار توسط دستگاه Schenck مطابق با شکل (۲) قرار گرفته و در آزمایشی دیگر، قطعی از یک نمونه ستون برای بدست آوردن رفتار تنش-کرنش فولاد توسط همین دستگاه تحت آزمایش کشش قرار گرفت که نتیجه آن در شکل (۳) قابل ملاحظه است. مطابق با شکل با توجه به روند تغییرات شیب در منحنی تنش-کرنش، قسمت‌های

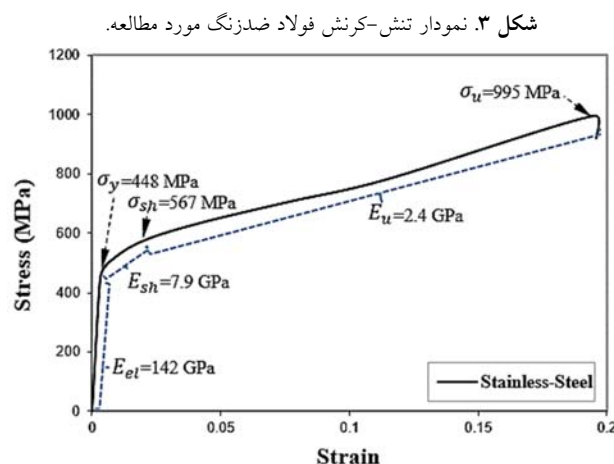


Fig. 3. Stress-strain curve of examined stainless-steel, obtained by tensile test.

۲- مدل سازی المان محدود

با توجه به شامل شدن رفتار غیرخطی مواد و هندسه در مدل‌ها، نرم افزار آباکوس [25] که دارای قابلیت بالا برای آنالیز رفتار غیرخطی است انتخاب شد. مدل المان محدود نمونه آزمایش شده در شکل (۴) ملاحظه می‌شود. با توجه به داشتن نسبت

شکل ۲. چیدمان آزمایش فشاری روی نمونه ستون لوله‌ای توسط دستگاه Schenck.



Fig. 2. Experimental setup for compressive test of the tubular column by Schenck machine.

شکل ۴. شرایط مرزی مدل المان محدود نمونه آزمایشگاهی ستون لوله‌ای.

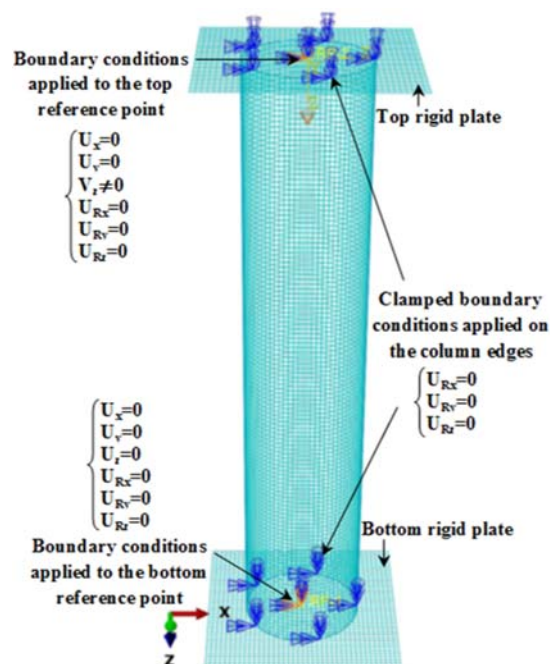


Fig. 4. Boundary conditions for the FE model of the experimental tubular column specimen.

غیرخطی مدل ستون‌ها، توسط تحلیل دینامیک صریح برای بررسی رفتار باربری و پس‌ازکمانش ستون‌ها انجام شد که دارای قابلیت بالا برای شبیه‌سازی رفتار پس‌ازکمانش و یا ملاحظه ناپیوستگی در اجزای سازه‌ای با صرف زمان کمتر بود.

۳- بحث روی نتایج

در این بخش، ابتدا روش مدل‌سازی المان محدود در مقایسه با نتایج نمودارهای بار-تغییر مکان و مشاهدات آزمایشگاهی تصدیق شده و سپس مدل‌های توسعه یافته برای تحقیق در مورد موضوع مقاله به کار گرفته شد. با توجه به تفاوت ظرفیت باربری ستون‌ها، به منظور ساده‌تر کردن مقایسه بین ظرفیت‌ها، پارامتری به نام تنش اسمی (σ_{nom}) و کرنش اسمی (ϵ_{nom}) با فرمول‌های زیر معرفی شدند که در آن P و A به ترتیب بار وارد شده به ستون و سطح مقطع و L و Δ به ترتیب برابر تغییر شکل و طول اولیه ستون هستند.

$$\sigma_{nom} = \frac{P}{A} \quad (1)$$

$$\epsilon_{nom} = \frac{\Delta}{L} \quad (2)$$

قطر به ضخامت بالا، ستون فولادی به وسیله المان‌های پوسته‌ای S4R مدل شد که دارای سه درجه آزادی جابه‌جایی و سه درجه آزادی چرخشی در هر گره است. با توجه به ضخامت بالا، ورق‌های تکیه‌گاهی ضخیم توسط المان‌های پوسته‌ای صلب مدل سازی شد. مشابه با دستگاه آزمایش، تکیه‌گاه پایینی در برابر همه درجات آزادی مقید و در مورد تکیه‌گاه بالایی تنها جابه‌جایی در راستای عمود به منظور بارگذاری تحت کنترل جابه‌جایی، آزاد و بقیه درجات آزادی مقید شد. در مورد مدل سازی ارتباط لبه‌های ستون با تکیه‌گاه، تحقیقات نسبتاً جامعی انجام شده [26] که بر اساس آن، با وجود سختی بالای ورق‌های تکیه‌گاهی، شرایط مرزی لبه ستون‌ها در محل اتصال با تکیه‌گاه در برابر درجات آزادی چرخشی بصورت گیردار در نظر گرفته شد به صورتی که لبه‌ها در محل اتصال با ورق، امکان چرخش نداشته باشند حال آنکه در صورت در نظر نگرفتن چنین قیدی، تغییر شکل لبه‌های ستون مطابق با مشاهدات آزمایشگاهی نبود [26, 27]. تماس بین لبه ستون و صفحات تکیه‌گاهی در دو راستای یکی عمود بر سطح با ضریب نفوذپذیری صفر و دیگری مماس بر سطح با ضریب اصطکاک برابر $\mu=0.1$ تعریف شد. از آنجا که مدل‌سازی رفتار پس از کمانش اجزای سازه‌ای بدون در نظر گرفتن میزانی از خروج از مرکزیت هندسی دارای دقت کافی نیست، لازم است تعریف خروج از مرکزیت به علت هر منشاء احتمالی از قبیل برخورد هنگام حمل‌ونقل و یا در زمان ساخت در نظر گرفته شود که معمولاً مطابق با ترکیبی از مودهای کمانشی (ارتعاش) می‌باشد. در این تحقیق ضریب $t/100$ (ضخامت لوله) از ترکیب خطی سه مود اول کمانشی به عنوان خروج از مرکزیت هندسی در نظر گرفته شد [28] که با وجود نداشتن تأثیر محسوس کاهشی در ظرفیت باربری ستون، ستون را در مسیری مطابق با مشاهدات آزمایشگاهی سوق داد. برای به دست آوردن مودهای کمانشی ستون، آنالیز خطی کمانش روی ستون انجام شده و سپس تغییر شکل ستون مطابق با ترکیب سه مود اول بعنوان خروج از مرکزیت اولیه، با ضریب ذکر شده برای انجام آنالیز غیرخطی در نظر گرفته شد. تحلیل

لحظه آستانه فروریزش جهت محاسبه جذب انرژی ویژه (SEA) [30] در ستون‌ها محاسبه شده و مطابق با

شکل ۵: نمودار تنش-کرنش اسمی بدست آمده برای نمونه آزمایشگاهی در مقایسه با نتایج مدل المان محدود.

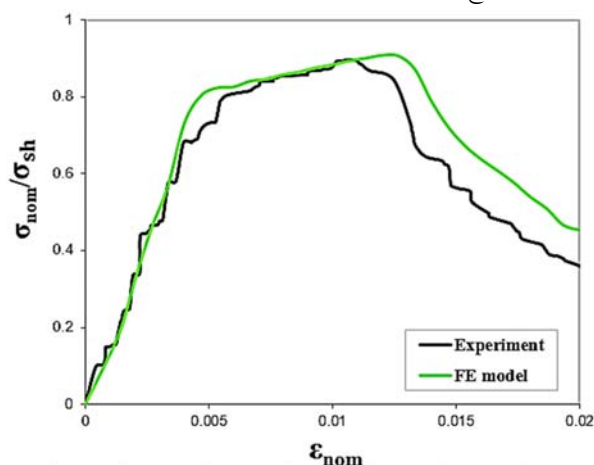


Fig. 5. Normalized nominal stress-strain curves, obtained by experiment and FE model for the experimental specimen.

شکل ۶: تغییر شکل مدل المان محدود در مقایسه با مشاهدات نمونه آزمایش در $\sigma_{nom}=0.54\sigma_{sh}$.

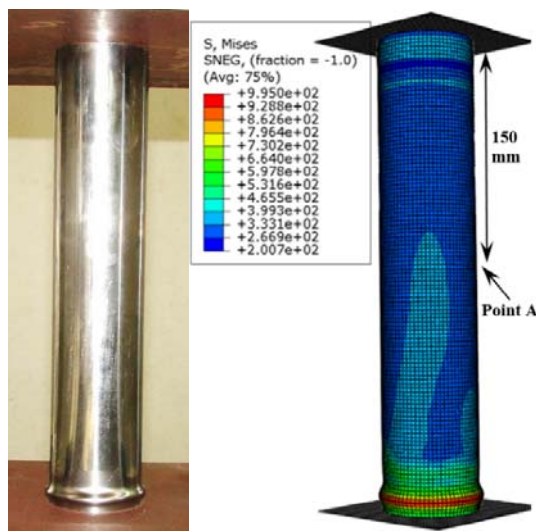


Fig. 6. Comparison of the results, obtained by experiment and FE model for deformation shape of the experimental specimen at $\sigma_{nom}=0.54\sigma_{sh}$.

برای درک بهتر میزان قابلیت ستون‌ها در افزایش ظرفیت وابسته به عملکرد در ناحیه کار-سختی ماده، نتایج نمودار باربری با تقسیم مقدار تنش اسمی بر مقدار تنش σ_{sh} ارائه شد.

۳-۱- تصدیق مدل سازی المان محدود

گزارش‌های موجود از رفتار ستون‌های دارای کمانش پلاستیک، نتایج بار-تغییر مکان را دارای دقت بیشتر نسبت به نتایج تنش-کرنش بدست آمده از کرنش سنج نصب شده روی جداره این اعضا نشان می‌دهد [26]. از این رو در این مطالعه، به منظور تصدیق روش مدل سازی، نتایج بار-تغییر مکان بدست آمده برای مدل المان محدود و نمونه آزمایش مطابق شکل (۵) مقایسه شد. همچنین تغییر شکل مدل المان محدود در $\sigma_{nom}=0.54\sigma_{sh}$ در مقایسه با تغییر شکل نمونه آزمایش متناظر با همین نقطه در شکل (۶) نشان داده شده است. سوئل و نیومن [29] کمانش پافیلی در ستون‌های لوله‌ای با $D/t=20-80$ را به علت تمرکز تنش برشی بین لبه‌های ستون و صفحات تکیه‌گاهی در نتیجه اصطکاک تماسی بین این سطوح معرفی کردند که موجب افزایش تنش طولی در این ناحیه شده و با وارد شدن سریع‌تر این ناحیه در رفتار پس از تسلیم ماده، مدول مماسی نسبت به مدل الاستیسته ستون کاهش یافته و ناپایداری موضعی ایجاد می‌شود که با افزایش تنش، منجر به کمانش می‌شود. نتایج، دقت خوبی برای مدل المان محدود در مقایسه با نتایج آزمایش نشان داد، از این رو با فرض شرایط مشابه و در نظر گرفتن ارتفاع و قطر ستون بصورت ثابت مطابق با نمونه آزمایشگاهی، ضخامت ستون تغییر داده شده و رفتار ستون برای نسبت قطر به ضخامت برابر $D/t=30, 40, 50, 60, 80$ 100, 120 ملاحظه شد که نمودارهای تنش-کرنش اسمی بدست آمده در شکل (۷) نشان داده شده است. کمانش همه ستون‌ها به شکل پافیلی بوده، حال آنکه با افزایش بار پس از کمانش اولیه، شکل ناحیه کمانه کرده برای ضخامت‌های مختلف ستون تغییر کرده که شکل مقطع برای تعدادی از آن‌ها در شکل (۸) ملاحظه می‌شود. برای مقایسه میزان جذب انرژی در ستون‌ها با نسبت‌های مختلف D/t ، سطح زیر منحنی تنش-کرنش اسمی را برای هر یک از مدل‌ها از لحظه بارگذاری تا

۱۱۱٪ افزایش پیدا کرده است. حال آنکه با کاهش ضخامت در ستون‌ها نسبت به ستون با $D/t=60$ ، مطابق با نمودار شکل (۹)، مقدار جذب انرژی پیش از کمانش کاهش قابل توجهی یافته است.

۳-۲- تأثیر تغییر مدول مماسی ناحیه کار-سختی روی شکل‌پذیری ستون‌ها

از آنجا که از بین مدل‌های مختلف بررسی شده، نمونه‌های دارای ضخامت کمتر، با قابلیت کمتری برای توسعه تنش پس از تسلیم مشاهده شدند، برای بررسی موضوع مقاله، از بین نمونه‌های بررسی شده، نمونه آزمایشگاهی با $D/t=60$ و نمونه دیگر ضعیف‌ترین ستون با $D/t=30$ انتخاب شده و بررسی تأثیر تغییر شیب در بخش کار-سختی منحنی تنش-کرنش شامل دو قسمت یکی تأثیر تغییر E_{sh} و دیگری تأثیر تغییر E_u روی رفتار دو مدل ملاحظه شد. بدین منظور مواد جدیدی با نام و خصوصیات مشخص شده در جدول (۱) در نظر گرفته شدند که در آن‌ها، نسبت e_{sh} و e_u به صورت نسبتی از مقدار E_{sh} و E_u تعیین شد. در این جدول، ابتدا شیب منحنی در قسمت کار-سختی مقدم (e_{sh}) با معرفی مواد SS1 تا SS6 تغییر داده شده و رفتار در مقایسه با ماده آزمایشگاهی (SSexp) ملاحظه شد، سپس تأثیر تغییر مدول مماسی در قسمت.

شکل ۹. نمودار انرژی جذب شده ویژه و نسبت e/g برای ستون‌های مختلف با تغییر نسبت D/t .

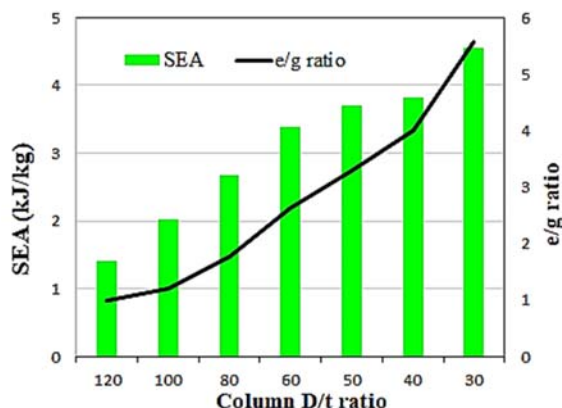


Fig. 9. Ratios of SEA and e/g for the columns of various D/t ratios.

شکل ۷. نمودار تنش-کرنش اسمی بدست آمده از مدل‌های المان محدود برای ستون‌ها با تغییر ضخامت.

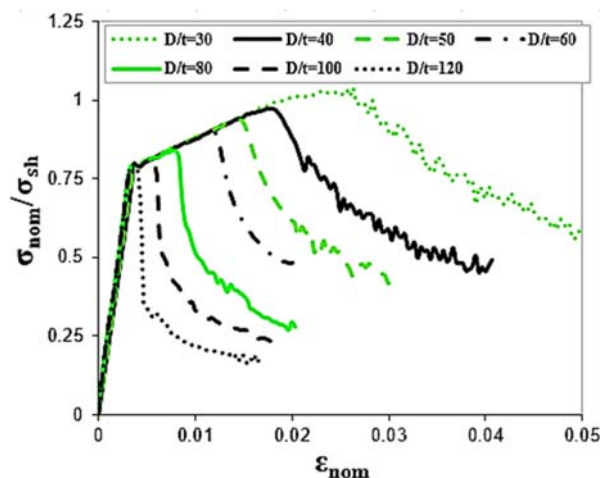


Fig. 7. Normalized nominal stress-strain curve, obtained for the FE models with various D/t ratios.

شکل ۸. تغییر شکل انتهای ستون‌ها برای (الف) $D/t=30$ ، (ب) $D/t=60$ ، (ج) $D/t=120$.

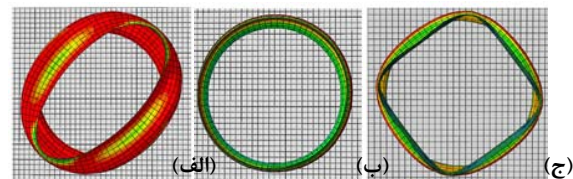


Fig. 8. Plastic buckling deformation shape for columns of (a) $D/t=30$, (b) $D/t=60$, (c) $D/t=120$.

نمودار شکل (۹) مقایسه شد. همچنین در همین نمودار، نسبت e/g برای ستون‌های مختلف ارائه شده است. مطابق با نمودار، پارامتر e/g برای ستون $D/t=100$ برابر $1/7$ بوده پس دو ستون $D/t=100, 120$ با رفتار تحت کنترل نیرو و مابقی ستون‌ها با رفتار تحت کنترل تغییر شکل محسوب می‌شوند. هر دو پارامتر e/g و معیار جذب انرژی با افزایش ضخامت در ستون‌ها افزایش یافته و در مورد ستون با $D/t=30$ جهش قابل توجهی داشت که تأثیر مهم ناحیه کارسختی را در افزایش ظرفیت باربری این ستون نشان می‌دهد. در شکل (۱۰)، توزیع تنش طولی در بخش انتهایی ستون با $D/t=30$ ارائه شده که نشان‌دهنده ظرفیت بالای این ستون برای بهره‌گیری از رفتار کار-سختی ماده قبل از رسیدن به آستانه فروریزش است به صورتی که میزان جذب انرژی ویژه و نسبت e/g در ستون $D/t=30$ نسبت به ستون $D/t=60$ به ترتیب حدود ۳۵٪ و

کار-سختی مقدم که در موارد SS1 و SS2 پیشنهاد شده، ظرفیت پایداری ستون با $D/t=60$ پس از ناحیه تسلیم بصورت کامل از بین رفته، حال آنکه در مورد ستون $D/t=30$ ، ظاهراً ستون با وجود بخش کار-سختی مؤخر توانسته پایداری خود را بعد از نقطه تسلیم حفظ کند. به عبارتی در صورت داشتن ماده‌ای با رفتار تسلیم کامل، در صورتی که ماده دارای ظرفیت کار-سختی مؤخر باشد، ستون جدار نازک‌تر فرصت استفاده از این ظرفیت را نداشته ولی ستون ضخیم‌تر می‌تواند پایداری خود را تا رسیدن به این بخش از کار-سختی حفظ کند هرچند، ظرفیت باربری ماکزیمم و جذب انرژی آن به صورت قابل توجه کاهش می‌یابد. با افزایش شیب e_{sh} تعریف شده برای ماده از SS2 تا SS6، در ستون $D/t=60$ علاوه بر ظرفیت باربری، میزان جذب انرژی نیز افزایش یافته، اما در مورد ستون $D/t=30$ ، ظرفیت باربری افزایش یافته ولی در فروریزش ستون تأخیر بیشتری ایجاد نشده است. در این مشاهدات، بخش کار-سختی مقدم برای ستون با $D/t=60$ با اهمیت بیشتر ملاحظه می‌شود.

طبق شکل (۱۲ الف) در مورد نسبت e/g برای ستون $D/t=60$ ، کمترین مقدار مدول مماسی برای اینکه ستون رفتاری شکل‌پذیر (با $e/g > 2$) داشته باشد، بیش از $e_{sh}=50\%E_{sh}$ است که نسبت e/g با فرض داشتن ماده SS4 برای ستون، برابر $1/996$ بدست آمده است. با افزایش مدول مماسی در بخش کار-سختی مقدم به دو برابر و داشتن مدول مماسی مؤخر به صورت ثابت، نسبت e/g و میزان جذب انرژی در ستون $D/t=60$ به ترتیب 26% و 46% افزایش یافته است که این نتایج اهمیت رفتار کار-سختی را نشان می‌دهد بدون اینکه نیاز به افزایش مدول الاستیسیته وجود داشته باشد. شکل (۱۲ ب) میزان جذب انرژی ویژه و نسبت e/g را برای ستون $D/t=30$ نشان می‌دهد که حاکی از واکنش ضعیف‌تر این ستون نسبت به افزایش مدول مماسی در ناحیه کار-سختی مقدم می‌باشد، بدین معنی که افزایش مدول مماسی، افزایشی را در میزان جذب انرژی تا آستانه فروریزش ستون به همراه نداشته و حتی

شکل ۱۰. توزیع تنش طولی روی جداره داخلی در ناحیه بحرانی ستون با $D/t=30$ در آستانه فروریزش.

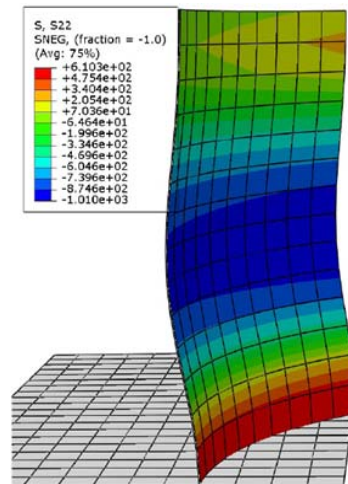


Fig. 10. Longitudinal stress distribution on the internal face for the critical region of the column with $D/t=30$ at the collapse threshold.

جدول ۱. تعریف مصالح با مدول مماسی مختلف در ناحیه کار-

سختی منحنی تنش-کرنش نسبت به فولاد ضدزنگ آزمایشگاهی.

نام مصالح	e_{sh}	e_u
SS1	0% E_{sh}	0% E_u
SS2	0% E_{sh}	100% E_u
SS3	100% E_u	100% E_u
SS4	50% E_{sh}	100% E_u
SS _{exp}	100% E_{sh}	100% E_u
SS5	150% E_{sh}	100% E_u
SS6	200% E_{sh}	100% E_u
SS7	100% E_{sh}	0% E_u
SS8	100% E_{sh}	200% E_u

Table 1. Determination of tangential modulus for work-hardening region of stress-strain curve, based on the values examined for the experimental specimen.

کار-سختی مؤخر (e_u) با معرفی مواد SS7 و SS8 به ترتیب با صرف‌نظر کردن از این قسمت ($e_u=0$) و سپس دو برابر کردن مدول ($e_u=200\% E_u$) مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۱۱) تأثیر تغییر مدول مماسی کار-سختی مقدم (e_{sh}) را روی رفتار باربری ستون‌های منتخب نشان می‌دهد و شکل (۱۲) مقادیر معیار جذب انرژی نسبت به سطح مقطع ستون و پارامتر e/g را در مقابل تغییر مدول مماسی نشان می‌دهد. مطابق با نمودار شکل (۱۱ ب)، در صورت صفر بودن مدول مماسی

این خصوص، سه حالت مورد مقایسه قرار گرفته که شامل SS7 با

شکل ۱۲: نمودار انرژی جذب شده ویژه و نسبت e/g در ستون‌های منتخب با تغییر مدول مماسی ماده پس از تسلیم مطابق با جدول ۱، (الف) ستون با $D/t=60$ ، (ب) ستون با $D/t=30$.

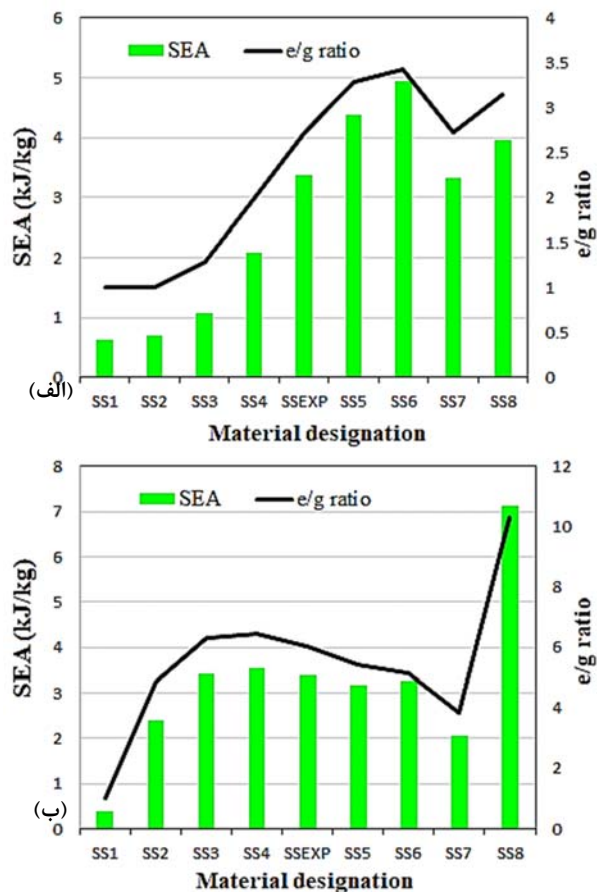


Fig. 12. Ratios of SEA and e/g by variation of material work-hardening response according to Table 1 for the columns of (a) $D/t=60$, (b) $D/t=30$.

مدول مماسی e_u برابر صفر و SS8 با مدول مماسی $e_u=200\%E_{sh}$ می‌باشد حال آنکه مطابق شکل (۱۳-الف)، این تغییرات تأثیر زیادی در بهبود رفتار شکل‌پذیری ستون $D/t=60$ نداشته است اما در مورد نمونه $D/t=30$ مطابق با شکل (۱۳-ب)، افزایش دو برابری e_u نسبت به مقدار آزمایشگاهی، ظرفیت باربری و جذب انرژی را در ستون به طرز چشمگیری افزایش داده است، به صورتی که جذب انرژی به مقدار ۱۱۱٪ و نسبت e/g به مقدار ۷۱٪ نسبت به ستون ساخته شده از فولاد ضدزنگ آزمایشگاهی

شکل ۱۱. نمودار تنش-کرنش اسمی بدست آمده برای ستون‌های منتخب با تغییر خصوصیات در ناحیه مقدم کار-سختی فولاد ضدزنگ مورد بررسی، (الف) ستون $D/t=60$ ، (ب) ستون $D/t=30$.

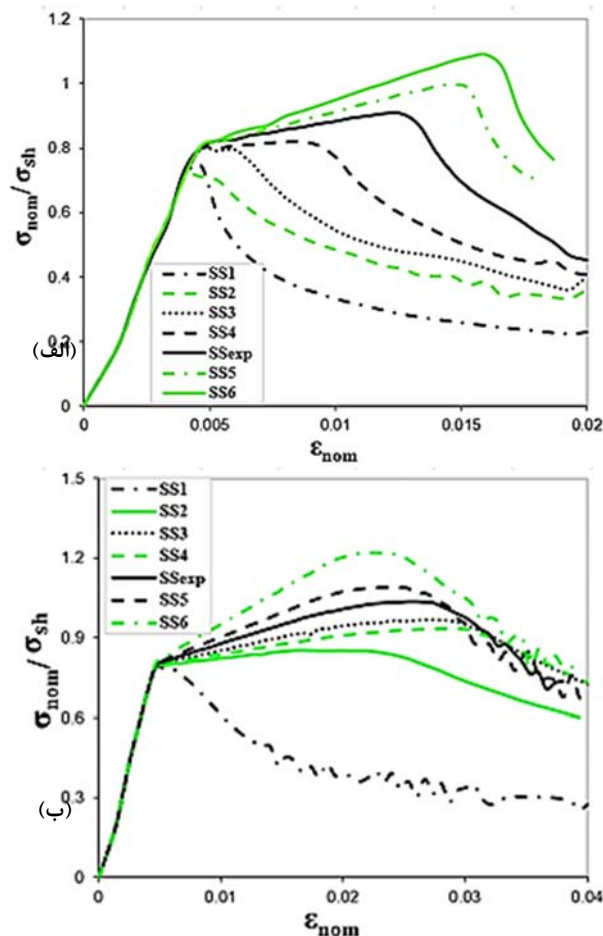


Fig. 11. Normalized nominal stress-strain curves, obtained for the various earlier work-hardening responses compared to the examined material in the experiment for the columns of (a) $D/t=60$, (b) $D/t=30$.

نسبت e/g را کاهش داده است که نتیجه‌ای کاملاً متفاوت با نتایج مشاهده شده در مورد ستون $D/t=60$ می‌باشد. البته صفر بودن مدول مماسی در این ناحیه، ضعیف‌ترین نتایج را در پی داشته و بهترین نتایج مربوط به ماده SS3 است که در آن، مقدار $e_{sh}=E_u$ در نظر گرفته شده است.

شکل (۱۳) تأثیر تغییر شیب مدول مماسی کار-سختی مؤخر (e_u) را روی رفتار باربری ستون‌های منتخب نشان می‌دهد. در

طراحی اعضا با شکل‌پذیری بالا امروزه به شدت مورد توصیه و پراش‌های جدید آیین‌نامه‌های طراحی اعضای سازه‌ای قرار گرفته و در این خصوص، پیش‌بینی چنین رفتاری در ستون‌ها با توجه به نقش محوری آن‌ها در پایداری سازه‌ها با اهمیت بیشتری به نظر می‌رسد. در این مقاله رفتار باربری و فروریزش ستون‌های لوله‌ای که مقطعی بهینه در برابر بارهای فشاری محسوب می‌شود تحت تأثیر تغییر رفتار تنش-کرنش یک نمونه فولاد ضدزنگ در ناحیه پس از تسلیم مورد بررسی قرار گرفت. برنامه آزمایشگاهی با انتخاب ابعاد نمونه‌ها با هدف ملاحظه کماتش پلاستیک اختصاص یافته و مدل المان محدود شبیه‌سازی شده، توسط نتایج آزمایشگاهی مورد تصدیق قرار گرفت. در ادامه مطالعه المان محدود برای ستون‌ها با نسبت قطر به ضخامت مختلف توسعه یافته و رفتار کماتش پلاستیک با تغییر خصوصیت D/t ملاحظه شد.

تأثیر شیب منحنی تنش-کرنش در ناحیه پس از تسلیم که به عنوان کار-سختی شناخته می‌شود در دو بخش مقدم و مؤخر مورد بررسی قرار گرفته و ناحیه مؤثرتر در مورد هر یک از ستون‌ها مشخص شد که در مورد ستون $D/t=60$ به عنوان ستونی با نسبت قطر به ضخامت متوسط، ناحیه مقدم کار-سختی و در مورد ستون $D/t=30$ بعنوان ستونی با نسبت قطریه ضخامت زیاد، ناحیه مؤخر کار-سختی تأثیر مهمی داشت. نتایج، افزایش مدول مماسی در بخش مقدم کار-سختی به اندازه دو برابر را باعث افزایش ۲۶٪ جذب انرژی ویژه و ۴۶٪ برای نسبت e/g در ستون $D/t=60$ ، و افزایش مدول مماسی بخش مؤخر کار-سختی به اندازه دو برابر را باعث افزایش ۱۱٪ برای جذب انرژی و ۷۱٪ برای نسبت e/g در ستون $D/t=30$ نشان دادند. نتایج تحقیق حاضر می‌تواند برای برنامه‌ریزی برای طراحی ترکیب شیمیایی انواع فولاد با هدف افزایش شکل‌پذیری این اعضا در کاربردهای سازه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

۵- مراجع

[1] FEMA 356, NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings. Washington DC:

شکل ۱۳. نمودار تنش-کرنش اسمی بدست آمده برای ستون‌های منتخب با تغییر ویژگی‌های در ناحیه مؤخر کار-سختی فولاد ضدزنگ مورد بررسی، (الف) ستون $D/t=60$ ، (ب) ستون $D/t=30$.

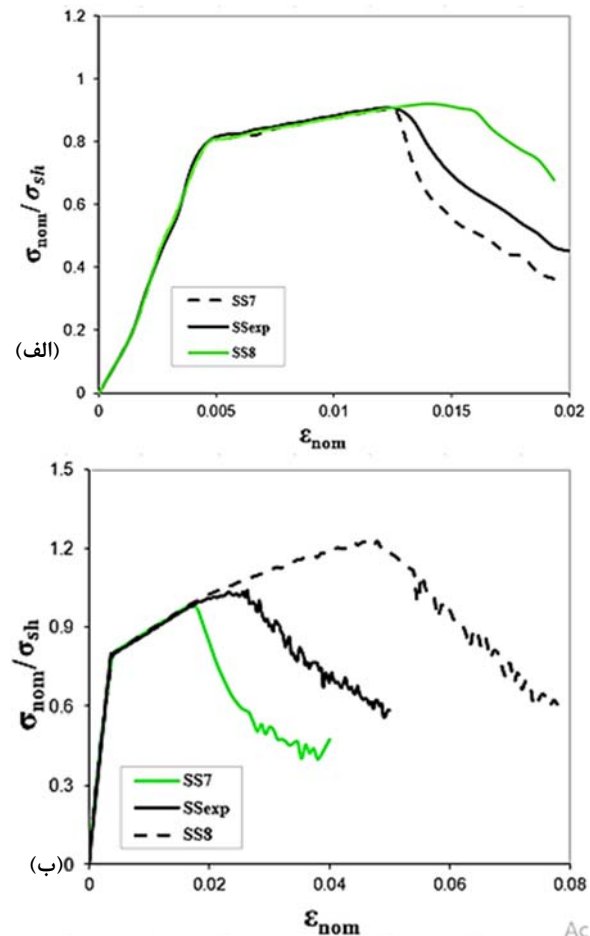


Fig. 13. Normalized nominal stress-strain curves, obtained for the various later work-hardening responses compared to the examined material in the experiment for the columns of (a) $D/t=60$, (b) $D/t=30$.

افزایش یافته است حال آنکه در صورت صفر بودن مقدار مدول مماسی در ناحیه کار-سختی مؤخر، میزان جذب انرژی ویژه و نسبت e/g به مقدار ۳۹٪ و ۳۶٪ نسبت به ستون دارای فولاد SS_{exp} کمتر ملاحظه شده است. این نتایج اهمیت بیشتری برای بخش کارسختی مؤخر در مورد ستون‌های با جدار ضخیم‌تر نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

- beam-columns. Thin-Wall Struct 2023;185:110573.
- [16] Jindra D, Kala Z, Kala J. Buckling curves of stainless steel CHS members: Current state and proposed provisions. J Constr Steel Res 2022;198:107521.
- [17] Huang Y, Young B. Finite element analysis of cold-formed lean duplex stainless steel columns at elevated temperatures. Thin-Wall Struct 2019;143: 106203.
- [18] Xing Z, Zhao O, Kucukler M, Gardner L. Testing of stainless steel I-section columns in fire. Eng Struct 2021;227:111320.
- [19] Ren Y, Huo R, Zhou D. Buckling and post-buckling analysis of restrained non-uniform columns in fire. Eng Struct 2022;272:114947.
- [20] Martins AD, Gonçalves R, Camotim D. Numerical simulation and design of stainless steel columns under fire conditions. Eng Struct 2021;229:111628.
- [21] González-de-León I, Natri E., Arrayago I, Montuori R, Piluso V, Real E. Experimental study on stainless steel tubular members under cyclic loading. Thin-Wall Struct 2022;181:109969.
- [22] Shi F, Wang D, Chen L. Cyclic elastoplastic constitutive model for stainless steels compatible with multiple strengths. J Constr Steel Res 2023;205:107889.
- [23] Akrami V, Norouzi M, Teymour-Moghaddam S. A parametric study on the axial load carrying capacity of dented cylindrical columns. MCEJ 2021;21(4):19-33.
- [24] Tajdari M, Azimi M, Khorram M, Eskandari J. Numerical and experimental investigations on buckling of steel cylindrical shells with triangular cutout subject to axial compression. Modares Mechanical Engineering, 2013;13(1), 24-37.
- [25] ABAQUS. ABAQUS/Standard User's Manual. ABAQUS Inc; 2010.
- [26] Teng JG, Hu YM. Behaviour of FRP-jacketed circular steel tubes and cylindrical shells under axial compression, Constr Build Mater 2007;21(4):827-38.
- [27] Nazari, AR, Kabir, MZ, Hosseini-Toudeshky H. Development of work-hardening performance in stainless-steel cylindrical columns by application of CFRP jackets, Composite Structures 2018;203:38-49.
- [28] Zhao O, Gardner L, Young B. Structural performance of stainless steel circular hollow sections under combined axial load and
- Federal Emergency Management Agency; 2000.
- [2] Afshan S., Gardner L. The continuous strength method for structural stainless steel design, Thin-Walled Structures 2013;68:42-49.
- [3] Gardner L. The use of stainless steel in structures. Progress in Structural Engineering and Materials, 2005;7(2):45-55.
- [4] Van den Berg JG. The effect of the non-linear stress-strain behaviour of stainless steels on member capacity. J Constr Steel Res 2000;54:135-60.
- [5] Abramowicz W, Jones N. Dynamic progressive buckling of circular and square tubes. Int J Impact Engng 1986;4(4):243-70.
- [6] Abramowicz W, Jones N. Transition from initial global bending to progressive buckling of tubes loaded statically and dynamically. Int J Impact Engng, 1997;19:415-37.
- [7] Tvergaard V. On the transition from a diamond mode to an axisymmetric mode of collapse in cylindrical shells. Int J Solids Struct 1983;19(10):845-56.
- [8] Gupta NK, Nagesh. Collapse mode transitions of thin tubes with wall thickness, end condition and shape eccentricity. Int J Mech Sci 2006;48:210-23.
- [9] Gupta NK, Velmurugan R. Consideration of internal folding and non-symmetric fold formation in axisymmetric axial collapse of round tubes. Int J Solids Struct 1997;34(20), 2611-30.
- [10] Gardner L, Wang F, Liew A. Influence of strain hardening on the behaviour and design of steel structures. Int J Struct Stab Dy, 2011;11(5):855-75.
- [11] Zhao O, Gardner L, Young B. Structural performance of stainless steel circular hollow sections under combined axial load and bending-Part 1: Experiments and numerical modelling. Thin-Wall Struct 2016; 101:231-9.
- [12] Ashraf M, Gardner L, Nethercot D. Strength enhancement of the corner regions of stainless steel cross-sections. J Constr Steel Res 2005;61(1):37-52.
- [13] Huang Y, Young B. Structural performance of cold-formed lean duplex stainless steel columns. Thin-Walled Struct 2014;83:59-69.
- [14] Zhao O, Gardner L, Young B. Behaviour and design of stainless steel SHS and RHS beam-columns. Thin-Wall Struct 2016;106:330-345.
- [15] Židlický B, Jandera M. An interaction formula proposed for stainless steel SHS and RHS

- bending – Part 1: experiments and numerical modelling. Thin-Wall Struct 2016;101:231–9.
- [29] Sobel LH, Newman SZ. Plastic buckling of cylindrical shells under axial compression. J Press Vessel Technol 1980;102(1):40–4.
- [30] Alhyari, O.; Newaz, G. Energy Absorption in Carbon Fiber Composites with Holes under Quasi-Static Loading. C 2021;7:16.

On the influence of tangential modulus in work-hardening part of stress-strain curve on ductility of stainless-steel tubular columns

Ali Reza Nazari^{1*}, Amir Hossein Karimi²

^{1,2} Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Technical and Vocational University, Tehran, Iran

*Corresponding author Email: arnazari@tvu.ac.ir

Abstract

Regarding the dependence of ductility response in structural components on their ability to keep stability after yielding of the material, in this paper, the influence of change in tangential modulus of work-hardening part of stress-strain response, was observed on the load carrying capacity and plastic buckling response of stainless-steel tubular columns. To keep cost-effectivity in the research, the objective of the study was followed by FE modeling, which was verified by simulation of plastic buckling in an experimental specimen with $D/t=60$, made of duplex stainless-steel. For all components of the models, S4R elements were used and both material and geometrical nonlinearity were included in the models. To conduct deformation of the columns according to the experimental observations, an initial imperfection equal to $t/100$ to combination of first three mode shapes of the columns was imported. The material stress-strain response after yield point was determined for the model by a multilinear curve according to the tensile stress-strain curve, obtained experimentally. The main parameters for comparison of the FE model and experimental observation were force-displacement curves. The FE study was extended by modeling of stainless-steel columns with various D/t ratios in range of $D/t=30-120$. Two main parameters comprised of energy absorption capacity and deformation of the column related to yield of the section and collapse threshold (e/g) were compared to the columns with various D/t ratios.

According to force-deformation curves, by decrease of D/t ratio, the energy absorption capacity increased considerably for the columns, for example the energy absorption capacity and e/g ratio increased by 12% and 12%, respectively for comparison of the columns with $D/t=60$ and $D/t=30$, however, e/g ratio for the columns of $D/t=120$ and 100 were less than two, categorized as a force-controlled column. Two models with $D/t=30$, 60 were selected to follow the objective of the study. The work-hardening response of the material was approximated by two linear segments, the first by a tangential modulus equal to $E=7.9$ GPa and the second was by the tangential modulus equal to $E=2.4$ GPa. The influence of change in tangential modulus through a range between 0-200% was observed on the structural parameters related to ductility, comprised of energy absorption capacity up to collapse threshold and deformation of column at the collapse threshold. The results showed different reaction of the columns with different D/t ratios, increase of tangential modulus at the first work-hardening part was more significant than increase of the influence by the later part of the work-hardening response for the column of $D/t=60$, however an inverse effect was observed for the column of $D/t=30$, i.e. the influence of tangential modulus at the later part was more significant for this column. By doubling the tangential modulus of earlier part of the work-hardening response, the energy absorption capacity and e/g ratio for the column of $D/t=60$ increased by 26% and 46%, respectively. By doubling the tangential modulus of later part of work-hardening response, the energy absorption capacity and e/g ratio for the column of $D/t=30$ increased by 111% and 71%, respectively. The results showed significant parts of work-hardening response of duplex stainless-steel, to be exploited for development of ductility in the tubular columns.

Keyword: Ductility; Buckling; Work-hardening response; Tubular column; Tangential modulus.