

بررسی پارامتریک ظرفیت باربری محوری ستون‌های استوانه‌ای در حضور آسیب از نوع قرشدگی

وحید اکرمی^{۱*}، میثم نوروزی^۲، ساسان تیمورمقدم^۳

۱. استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
۲. کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
۳. کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

*v.akrami@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۷/۳۰ تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۱/۲۰

چکیده

وجود نقص‌های سازه‌ای می‌تواند ظرفیت باربری اعضای فشاری را تا حد زیادی کاهش دهد. این نقص‌ها می‌توانند از نوع ترک‌خوردگی، سوراخ‌شدگی و یا فرورفتگی سطح صاف عضو به دلیل برخورد یک جسم خارجی ایجاد شوند. به عنوان نمونه اعضای استوانه‌ای سکوها دریا یا پایه پل‌ها و ساختمان‌ها که عمدتاً تحت بارهای محوری هستند ممکن است حین پهلوگیری کشتی‌ها و یا توسط وسایل نقلیه سنگین که در حال حرکت هستند دچار آسیب شوند. وجود نواقص یاد شده در اعضای محوری با مقطع دایره‌ای می‌تواند باعث بروز خرابی زود هنگام این المان‌های سازه‌ای به دلیل کماتش موضعی و در ادامه کماتش کلی عضو شود. پس باید ظرفیت باربری محوری و آثار مخرب آسیب وارد شده را پیش‌بینی کنیم و تاثیر پارامترهای هندسی و مکانیکی فرورفتگی‌های ایجاد شده در اثر برخوردهای احتمالی بر نوع شکست عضو بررسی شود. در این مطالعه برای بررسی ظرفیت باربری محوری ستون‌های استوانه‌ای یاد شده با بهره‌گیری از روش اجزای محدود، ستون‌های استوانه‌ای در اثر آسیب وارد شده از سوی یک جسم کروی قرار گرفته و تاثیر عوامل مختلف به صورت پارامتریک بررسی شده است. برای مدل‌سازی از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده و مدل‌های عددی با استفاده از نتایج آزمایش محوری یک استوانه جدارنازک درستی‌آزمایی شده‌اند. پارامترهای مورد بررسی شامل: عمق آسیب، لاغری جداره استوانه، محل آسیب، طول عضو محوری و شعاع جسم برخورد کننده هستند. با توجه به نتایج تحلیل‌های انجام شده، عمق آسیب و لاغری جداره استوانه، پارامترهای تاثیرگذار بر ظرفیت کماتشی استوانه‌های آسیب دیده تحت بار محوری هستند. بر همین اساس، با افزایش عمق آسیب و لاغری جداره استوانه مقدار بار کماتش نمونه کاهش می‌یابد. این در حالی است که شکل کماتش یافته نمونه‌های با عمق آسیب و لاغری جداره متفاوت بیشتر مشابه هم بوده و تفاوت چندانی با هم ندارند. رفتار پس کماتشی این اعضا متأثر از لاغری جداره استوانه، محل آسیب و طول

عضو است. به گونه‌ای که با افزایش لاغری جداره استوانه و طول عضو و همچنین نزدیک‌تر شدن محل آسیب به تکیه‌گاه، ظرفیت پس کمانشی نمونه کاهش می‌یابد. همچنین با نزدیک‌تر شدن محل آسیب به تکیه‌گاه، حلقه کمانش در نزدیکی تکیه‌گاه دورتر حذف و کل تغییرشکل‌ها در سمت تکیه‌گاه نزدیک متمرکز می‌شود که زوال مقاومت بیشتر را در پی دارد. شعاع جسم برخورد کننده تأثیری بر ظرفیت کمانشی یا رفتار پس کمانشی نمونه ندارد. برای نمونه‌های آسیب دیده توسط اجسام با شعاع متفاوت ولی عمق آسیب مشابه، تفاوت موجود در پروفیل آسیب بسیار اندک است که همان تفاوت نیز هنگام روند افزایش تغییرشکل‌ها و بروز کمانش حذف شده و تغییرشکل نهایی نمونه‌ها مشابه هم می‌شود. در پایان، با برازش روابطی به نتایج بدست آمده از بررسی تأثیر هر پارامتر، روابطی برای تعیین ظرفیت کمانشی و ظرفیت پسماند (ظرفیت عضو در دو برابر تغییرشکل متناظر کمانش) اعضای محوری یاد شده ارائه شده است. بر اساس بررسی‌های به عمل آمده، دقت روابط ارائه شده مناسب بوده و می‌توان از این روابط در روند طراحی یا ارزیابی ثانویه نمونه‌های آسیب دیده استفاده نمود.

واژگان کلیدی: ستون استوانه‌ای، آسیب، ظرفیت کمانشی، رفتار پس کمانشی، تحلیل المان محدود

۱- مقدمه

غیرالاستیک خواهد شد. یکی از این انواع خرابی، کمانش غیرالاستیک پافیلیست که در تانکرها و سیلوهای ایستاده در اثر نیروی محوری و اصطکاکی مصالح ذخیره شده با دیواره این سازه‌ها می‌تواند ایجاد شود.

رفتار اعضای فشاری آسیب دیده توسط پژوهشگران متعددی مورد بررسی قرار گرفته است. آسیب‌های مورد مطالعه توسط این پژوهشگران عمدتاً از نوع ترک [3]، خوردگی، سوراخ شدگی [4, 5] و یا فرورفتگی سطح صاف عضو به دلیل آثار حرارتی [6] و یا برخورد یک جسم با لبه تیز [7] بوده است. در همین راستا هوتچینسون و همکاران [8] یک مطالعه تحلیلی-آزمایشگاهی برای بررسی بار کمانش اعضای فشاری استوانه‌ای با ناکاملی اولیه انجام دادند. این ناکاملی‌ها در هفت نمونه با ضخامت مختلف به صورت یک نوار پیرامونی فرورفته یا برآمده در قسمت میانی استوانه ایجاد و بررسی شد. در پژوهش دیگری، اکرمی و عرفانی [3] ظرفیت کمانش اعضای استوانه‌ای تحت فشار را در حضور ترک پیرامونی به صورت تحلیلی و عددی بررسی نمودند. استوانه ترک‌خورده به صورت دو المان تیر روی بستر الاستیک با یک فنر چرخشی معادل مدل‌سازی شده و معادله مشخصه حاکم به دست آمده است. از مدل‌های المان محدود برای بررسی نتایج تحلیلی و ارزیابی درستی آن‌ها استفاده شده است.

ژائو و همکاران [4] آثار نقص هندسی بر رفتار کمانشی لوله‌های جدار نازک تحت فشار را به صورت آزمایشگاهی و

پوسته‌های استوانه‌ای قسمت اصلی تانکرها و سیلوها، خطوط لوله انتقال مایعات، اعضای باربر سازه‌ای مانند ستون‌های سکوها، اسکله‌ها و پل‌ها و مخازن ذخیره سوخت را تشکیل می‌دهند. در بسیاری از موارد این سازه‌ها یا اعضای سازه‌ای در معرض برخورد اجسام خارجی قرار داشته و احتمال زیادی وجود دارد که دچار آسیب با ابعاد و اشکال گوناگون شوند. به عنوان نمونه اعضای استوانه‌ای سکوها دریایی یا پایه پل‌ها و ساختمان‌ها که عمدتاً تحت بارهای محوری هستند ممکن است حین پهلوگیری کشتی‌ها و یا توسط وسایل نقلیه سنگین دچار آسیب شوند. پس باید ظرفیت محوری و آثار آسیب وارد شده پیش‌بینی، و تأثیر پارامترهای هندسی فرورفتگی ایجاد شده در اثر برخوردهای احتمالی بر نوع شکست عضو بررسی شود.

مسئله کمانش پوسته‌های استوانه‌ای، از دهه‌های گذشته مورد توجه پژوهشگران بوده است. تیموشنکو با استفاده از تئوری کلاسیک رابطه‌ای را برای پیش‌بینی بار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک تحت فشاری محوری یکنواخت پیشنهاد داد (معادله ۲) [1] که برای استوانه‌های سالم با نسبت طول به قطر کمتر از ۵ ($L/R \leq 5$) دارای جواب مناسب است [2]. این رابطه برای پوسته‌های با لاغری متوسط ($D/t < 100$)، اغلب نشانگر بار کمانشی بیشتر است. با توجه به نتایج پژوهشهای گذشته ضخامت جداره بیشتر، باعث خرابی از نوع کمانش

عددی بررسی کردند. در این پژوهش ناکاملی‌ها به صورت برش دایره‌ای در رویه پوسته لحاظ شده است. نمونه‌های مورد بررسی با لحاظ پارامترهایی شامل شعاع ناکاملی، ضخامت پوسته و شعاع استوانه، مدلسازی و تحلیل شده‌اند. رستگار و همکاران [6] تاثیر آثار حرارتی ناشی از جوشکاری بر رفتار کمانشی مخازن استوانه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه یک تانکر ذخیره سوخت با ارتفاع ۱۲ متر، قطر ۲۳ متر و ضخامت ۱۸ میلی‌متر، در نظر گرفته شده و ناکاملی‌هایی شامل تاثیر دمای جوشکاری در روند ساخت و نصب ورق‌ها به صورت برآمدگی یا فرورفتگی لحاظ شده است. حضور این ناکاملی‌ها در نمونه‌های آزمایشگاهی مدلسازی شده و رفتار کمانشی آنها تحت فشار خارجی بررسی و ارزیابی شده است. قاضی‌جهانی و همکاران [7] کمانش پلاستیک لوله‌های فلزی دارای نقص اولیه را تحت فشار محوری ارزیابی کردند. در این مطالعه فرورفتگی‌ها روی نمونه‌های آزمایشی توسط یک جسم گوه‌ای با لبه تیز ایجاد شده و به صورت آزمایشگاهی تست شده است. در ادامه موده‌های شکست ارزیابی و ظرفیت باربری استوانه‌های آسیب دیده با در نظر گرفتن محل آسیب بررسی شده است. نقی‌پور و همکاران مجموعه مطالعات آزمایشگاهی و عددی را در زمینه ظرفیت باربری لوله‌های فولادی آسیب دیده تحت فشارهای داخلی و محوری انجام داده‌اند. برای این کار از فولاد با استحکام بالا استفاده شده و آسیب ایجاد شده در لوله‌ها به صورت فرورفتگی ناشی از فشردن یک سنبه با سر گرد در جداره لوله و یا کاهش ضخامت موضعی توسط دستگاه تخلیه الکتریکی بوده است. رفتار جانبی لوله‌ها تحت نیروی قر کننده وارد از طرف سنبه در مرجع [9]، رفتار لوله‌های آسیب دیده تحت بارگذاری محوری مونوتونیک در مرجع [10] و رفتار لوله‌های آسیب دیده تحت بارگذاری محوری پرخه‌ای در مرجع [11] گزارش شده است.

قائم‌دوست و همکاران [12] به بررسی رفتار سازه‌ای ستون‌های ناکارآمد مقاوم شده با ورقه‌های CFRP پرداختند. در این مطالعه رفتار ستون‌های کوتاه مربعی توخالی تحت فشار، همراه با ناکاملی‌های افقی یا عمودی به صورت برش در جداره

عضو و تقویت با الیاف پلیمری کربنی به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی شده است. وکیلی و شوکتی [13] به بررسی تجربی و عددی کمانش پافیلی و مقاوم‌سازی پوسته‌های استوانه‌ای توسط FRP پرداخته‌اند. بر اساس نتایج بدست آمده، کمانش در تانکرها و سیلوهای ایستاده از نوع غیرالاستیک پافیلی است که عمدتاً در اثر همزمانی فشار داخلی و نیروهای محوری رخ می‌دهد. درایدی و همکاران [14] بررسی رفتار کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای فلزی تقویت شده با لایه‌های کامپوزیت CFRP را در دستور کار قرار دادند. بر اساس نتایج، با بکارگیری این تمهیدات افزایش پیوسته ظرفیت باربری پوسته اتفاق می‌افتد. مهدی تاجداری و همکاران [15] به بررسی عددی و تجربی کمانش پوسته‌های جدار نازک استوانه‌ای فولادی با گشودگی‌های مثلثی تحت فشار محوری پرداخته‌اند. در این مقاله پوسته‌های استوانه‌ای فولادی جدار نازک با ضخامت، طول‌ها و قطرهای مختلف و حفره مثلثی شکل تحت بار فشاری مورد بررسی قرار گرفته‌اند. آثار موقعیت حفره، نسبت طول به قطر استوانه و نسبت قطر به ضخامت روی رفتار کمانشی و پس کمانشی این پوسته‌ها با استفاده از تحلیل عددی و آزمایشگاهی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است.

در این پژوهش ظرفیت باربری محوری ستون‌های استوانه‌ای در اثر آسیب وارد شده از سوی یک جسم کروی، به صورت پارامتریک و به روش اجزای محدود مورد بررسی قرار خواهد گرفت. پارامترهای مورد بررسی شامل: عمق آسیب، لاغری جداره استوانه، محل آسیب، طول عضو محوری و شعاع جسم برخورد کننده است. هندسه نمونه‌ها، فرضیات، چگونگی مدلسازی، نتایج تحلیل‌ها و تفسیر نتایج در بخش‌های آتی ارائه شده است.

۲- جزئیات مدلسازی

۲-۱- هندسه نمونه‌های مورد بررسی

هندسه عضو محوری مورد مطالعه و جسم کروی مورد استفاده برای ایجاد آسیب در شکل (۱) نمایش داده شده است.

است. همچنین هر المان در راستای ضخامت خود به پنج لایه تقسیم شده است. جسم کروی برخورد کننده به صورت صلب و استوانه مورد بررسی به صورت شکل پذیر با مدول الاستیسیته 201 GPa و ضریب پواسون 0.3 مدلسازی شده است. تنش تسلیم مصالح برابر با 345 MPa و شیب نمودار تنش-کرنش در ناحیه سخت شوندگی مصالح برابر با 1% لحاظ شده است. برای هر نمونه، تحلیل در سه گام شبه-استاتیکی نشان داده شده در شکل (۲)، انجام شده است. در گام نخست جسم کروی به سمت استوانه حرکت کرده و پس از برخورد با آن به اندازه عمق تعیین شده در دیواره پیشروی می‌نماید. اندرکنش بین سطوح برخوردکننده و استوانه از نوع تماس سخت ۲ تعریف شده است.

شکل ۲. نمایش مراحل تحلیل المان محدود

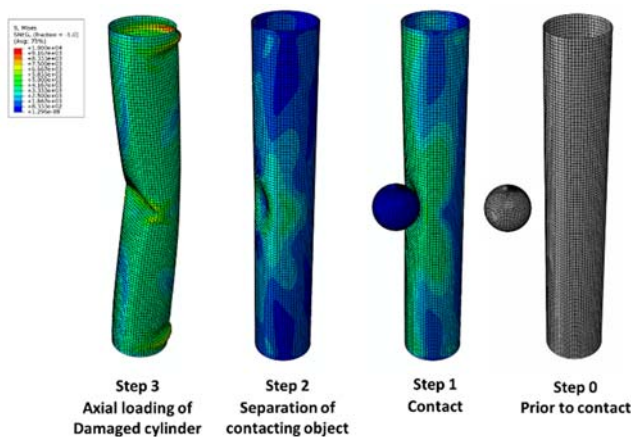


Fig. 2. Loading steps in numerical analysis

در قدم دوم، جسم کروی عقب نشینی نموده و پس از جدایی از استوانه، از فضای مدل عددی حذف می‌شود. در قدم پایانی، تغییر شکل محوری از بالا و پایین استوانه به صورت متقارن اعمال شده و عضو آسیب دیده دچار کمانش می‌شود. با توجه به کاربرد مورد انتظار از اعضای لوله‌ای یاد شده، ابتدا و انتهای استوانه به صورت گیردار مدلسازی شده است، که نشان دهنده حالت گیرداری آن در داخل سازه است. درستی آزمایی مدل‌های ایجاد شده در نرم‌افزار در بخش بعد ارائه شده است.

با توجه به شکل، یک جسم کروی با شعاع r در محلی به فاصله l از لبه ستون باعث ایجاد آسیبی به شکل فرورفتگی به اندازه D در عضو مربوطه می‌شود. طول نمونه مرجع برابر با 3 متر و قطر خارجی آن برابر با 50 سانتی‌متر لحاظ شده است ($L/D=6$). برای بررسی تاثیر طول ستون بر رفتار نمونه‌ها، دو مقدار دیگر برای نسبت L/D ، یکی برای ستون کوتاه‌تر ($L/D=4$) و دیگری برای ستون بلندتر ($L/D=8$)، در تحلیل‌ها استفاده قرار گرفته است. لاغری استوانه مربوطه به صورت پارامتریک بین دو مقدار $D/t=33/3$ و $D/t=125$ مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مقدار شعاع جسم کروی از 10 تا 25 سانتی‌متر (با گام 3 سانتی‌متر) متغیر در نظر گرفته و تاثیر محل ایجاد آسیب، l ، در سه حالت $L/6$ ، $L/3$ و $L/2$ بررسی شده است. مقدار آسیب (عمق فرورفتگی) از 1 تا 10 سانتی‌متر (با گام 1 سانتی‌متر) متغیر در نظر گرفته شده است.

شکل ۱. هندسه عضو محوری و جسم کروی مورد استفاده برای آسیب

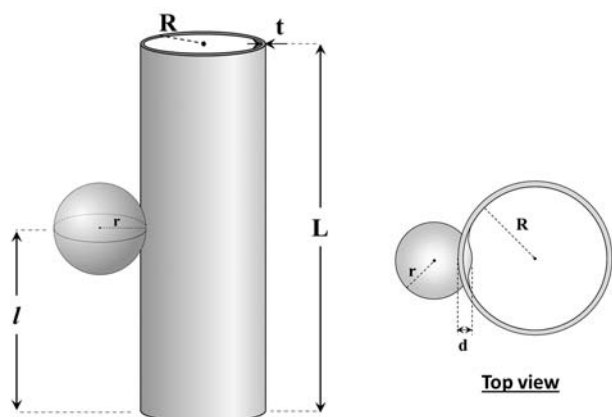


Fig. 1. Configuration of tubular member and hitting object

۲-۲- مدلسازی المان محدود

شبیه‌سازی مدل‌های المان محدود توسط نرم‌افزار آباکوس ۱ انجام شده است. برای مش‌بندی نمونه‌ها از المان چهار گرهی با انتیگرال‌گیری کاهش یافته (S4R) استفاده شده است. با توجه به نتایج تحلیل‌های حساسیت مش، ابعاد مش در راستای شعاعی و طولی برابر با 25 میلی‌متر (63 تقسیم در راستای شعاعی و 120 تقسیم در راستای طولی برای نمونه مرجع) در نظر گرفته شده

۳-۲- درستی آزمایشی مدل‌ها

تمامی نمونه‌های مربوط به فضای شرح داده شده در بخش قبل در این بند میسر نیست، پس نتایج مربوط به یک دسته نمونه در اینجا مورد بررسی قرار گرفته و تاثیر سایر پارامترها در بندهای آتی مورد بحث قرار می‌گیرد. دسته نمونه مورد بررسی در این بخش دارای جداره با لاغری $D/t=50$ ، ضخامت جداره $t=1.0\text{ cm}$ و شعاع جسم کروی برخوردکننده برابر با $r=1.0\text{ cm}$ می‌باشند. همچنین محل برخورد در وسط ارتفاع عضو است.

شکل ۳. مقایسه نتایج حاصل از تست آزمایشگاهی و تحلیل المان محدود

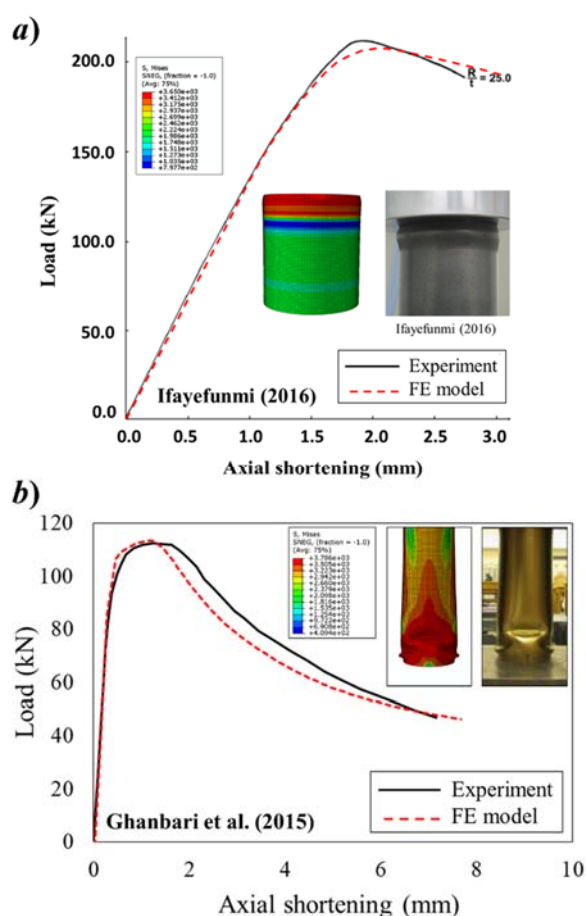


Fig. 3. Comparison of experimental and numerical analysis

شکل (۴) مقایسه نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ها با مقدار آسیب متفاوت را نمایش می‌دهد. بار کمانش و تغییر طول نسبی نمونه‌ها نیز در جدول (۱) خلاصه شده است. چنانچه در این شکل ملاحظه می‌شود، برای نمونه فاقد آسیب، تنش نهایی بالاتر از تنش تسلیم است. برای نمونه با آسیب $d=1.0\text{ cm}$ و $d=2.0\text{ cm}$ هنوز تنش نهایی بالاتر از تنش تسلیم است، لیکن مقدار بار

برای درستی آزمایشی نتایج تحلیل‌های اجزای محدود، از داده‌های آزمایشگاهی گزارش شده در دو مرجع [7 و 16] استفاده شده است. نمونه مورد آزمایش در اولین پژوهش استوانه فولادی بدون آسیب با نسبت قطر به ضخامت، $D/t=50$ ، طول 111.8 mm و میانگین ضخامت جداره برابر با 2.02 mm میلی‌متر بوده است. میانگین مدول الاستیسیته مصالح برابر با 241.4 GPa ، میانگین حد پایین و بالای تنش تسلیم به ترتیب 296.5 MPa و 322.1 MPa و میانگین مقاومت کششی نهایی برای فولاد مصرفی 374.4 MPa گزارش شده است. شکل (۳ الف) منحنی بار-تغییر طول محوری را برای این نمونه نمایش می‌دهد. نمونه مورد آزمایش در پژوهش دوم استوانه فولادی آسیب‌دیده با نسبت قطر به ضخامت، $D/t=47.6$ ، طول 220 mm و ضخامت جداره برابر با 1.6 mm میلی‌متر بوده است. آسیب به صورت فرو رفتگی افقی با عمق 4 mm و عرض 37 mm بوده و فاصله آن از تکیه‌گاه پایین 45 mm تنظیم شده است. مدول الاستیسیته مصالح برابر با 216.3 GPa ، تنش تسلیم برابر با 307 MPa و مقاومت کششی نهایی آن 360.2 MPa گزارش شده است. شکل (۳ ب) منحنی بار-تغییر طول محوری را برای این نمونه نمایش می‌دهد.

در ادامه، نمونه‌های مورد آزمایش بر اساس ویژگی‌های هندسی و مشخصات مکانیکی شرح داده شده، به صورت عددی شبیه‌سازی شده و تحلیل شده‌اند. برای انجام مقایسه، منحنی نیروی وارد شده تغییر طول محوری بدست آمده از تحلیل نمونه‌های عددی به همراه شکل کمانش یافته آن‌ها در شکل (۳) ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، شیب منحنی‌ها در محدوده خطی، ظرفیت کمانشی، تغییر شکل متناظر نقطه کمانش، رفتار پس کمانشی و همچنین شکل کمانش برای نمونه‌های عددی و آزمایشگاهی بسیار نزدیک به هم است.

۳- نتایج

۳-۱- تاثیر عمق آسیب وارده

در این بخش تاثیر میزان آسیب وارد شده به عضو محوری، که با میزان فرو رفتگی جسم کروی در بدنه عضو فشاری سنجیده می‌شود d ، مورد بررسی قرار می‌گیرد. از آنجاکه بررسی نتایج

شکل (۵) حالت کمانش یافته سه نمونه با آسیب متفاوت را در انتهای تحلیل نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل، حالت کمانش یافته نمونه‌ها عمدتاً مشابه هم بوده و تفاوت چندانی با هم ندارد. بدین ترتیب که تغییر شکل‌های ناحیه آسیب دیده در نمونه‌های با آسیب کم طی پروسه کمانش گسترش یافته و حالت نهایی عضو کمانش یافته مشابه نمونه‌های با آسیب زیاد می‌شود. مطابق شکل، حالت کلی کمانش برای نمونه‌های آسیب دیده به صورت دو نیم حلقه‌ای کمانشی در بالا و پایین عضو و یک ناحیه با تغییر شکل‌های خمشی در منطقه‌ی آسیب دیده عضو است.

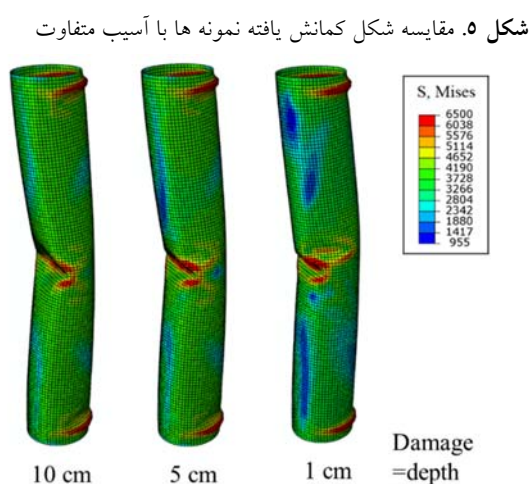


Fig. 5. Buckled shape of models with varying damage depth

برای تعیین مقدار کاهش ظرفیت باربری نمونه‌های مورد بررسی در اثر آسیب وارد شده می‌توان از رابطه زیر که از برازش غیرخطی در نرم‌افزار متلب بدست آمده است استفاده نمود:

$$\alpha_d = \frac{0.4312 \times \lambda_d}{0.3464 + \lambda_d}, \quad \lambda_d = \frac{d}{D} \quad (1)$$

در این رابطه α_d نسبت کاهش ظرفیت استوانه آسیب دیده به ظرفیت استوانه سالم بوده و λ_d نسبت عمق آسیب، d ، به قطر استوانه، D ، است. لازم به ذکر است که با استفاده از این ظرفیت باقی مانده مقطع $1-\alpha_d$ می‌باشد. چگونگی استفاده از این پارامتر در بند ۴ مورد بحث قرار گرفته است. لازم به ذکر است که برای نمونه‌های بررسی شده رفتار پس کمانشی متاثر از مقدار کاهش ظرفیت نهایی بوده و تاثیر عمق آسیب بر آن ناچیز است.

کمانش و تغییر طول نسبی متناظر لحظه کمانش با افزایش مقدار آسیب، کاهش می‌یابند. با افزایش بیشتر آسیب، تنش محوری متناظر کمانش به زیر تنش تسلیم افت می‌کند. در این محدوده با افزایش عمق آسیب مقدار بار کمانش کاهش می‌یابد. این در حالیکه تغییر طول نسبی متناظر لحظه کمانش با افزایش مقدار آسیب، افزایش می‌یابد. این مسئله را عمدتاً می‌توان به تغییر چگونگی کمانش از حالت دفعی محوری به حالت ملایم خمشی مرتبط دانست.

شکل ۴. نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ها با آسیب متفاوت ($D/t=50$)

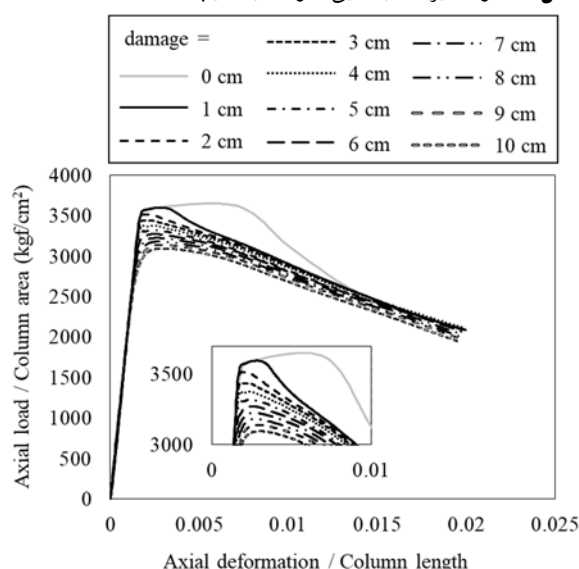


Fig. 4. Load-displacement curves for models with varying damage depth ($D/t=50$)

جدول ۱. مقایسه بارکمانش و تغییر طول نسبی نمونه‌ها با آسیب متفاوت

Damage depth (cm)	Buckling load (kgf/cm ²)		Axial shortening ratio at buckling	
	D/t=50	D/t=100	D/t=50	D/t=100
0	3680	3578	0.0053	0.0017
1	3598	3508	0.0029	0.0017
2	3519	3367	0.0019	0.0017
3	3444	3287	0.0019	0.0017
4	3380	3223	0.0024	0.0018
5	3326	3164	0.0024	0.0018
6	3274	3110	0.0025	0.0019
7	3226	3059	0.0026	0.0020
8	3182	3012	0.0028	0.0021
9	3140	2965	0.0029	0.0022
10	3096	2921	0.0030	0.0022

Table. 1 Buckling load and axial deformation of model with varying damage depth

۳-۲- تاثیر میزان لاغری جداره

میزان لاغری جداره اعضای استوانه‌ای بر ظرفیت باربری این اعضا تحت بار محوری تاثیرگذار می‌باشد. برای مقاطع استوانه‌ای جدار نازک، مقدار تنش بحرانی متناظر کمناش الاستیک از رابطه ی زیر محاسبه می‌شود [1]:

$$\sigma_{cr} = \frac{2 E}{\sqrt{3(1-\theta^2)}} \frac{t}{D} \quad \text{معادله ۲}$$

که در آن E مدول الاستیسیته، θ ضریب پواسون، D قطر استوانه و t ضخامت جداره می‌باشد. لازم به ذکر است که در صورت جایگزین نمودن مدول الاستیسیته، E با مدول کاهش یافته مقطع، E_r ، برای کمناش پلاستیک نیز می‌توان از این رابطه استفاده نمود. چنانچه در این رابطه ملاحظه می‌شود، ظرفیت کمناش الاستیک مقطع رابطی عکس با لاغری جداره دارد. بدین معنی که با افزایش قطر عضو یا کاهش ضخامت آن، میزان ظرفیت مقطع کاهش می‌یابد. آنچه در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد میزان تاثیرگذاری لاغری جداره‌ی مقطع بر کاهش ظرفیت ناشی از وارد آمدن آسیب می‌باشد. برای شروع، نمونه‌هایی مشابه مجموعه نمونه‌ی مورد بررسی در بخش قبل که دارای جداره با لاغری $D/t=100$ می‌باشند، مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۶ مقایسه نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ها را نمایش می‌دهد. بار کمناش و تغییر طول نسبی این نمونه‌ها نیز در جدول ۱ خلاصه شده است.

شکل ۶. مقایسه نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ها با مقدار آسیب متفاوت ($D/t=100$)

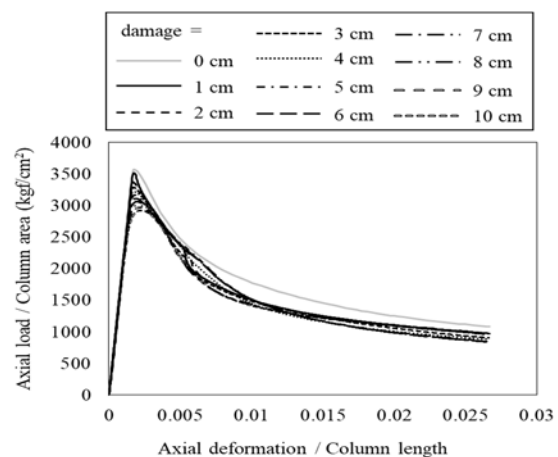


Fig. 6. Load-displacement curves for models with varying damage depth ($D/t=100$)

چنانچه در این شکل ملاحظه می‌شود، برای تمامی نمونه‌های مورد بررسی نیروی نرمالایز شده کمناش زیر تنش تسلیم مصالح بوده است. لازم به ذکر است که حتی در این حالت نیز کمناش نمونه‌های مورد بررسی در محدوده غیرالاستیک است. لیکن از آنجاکه به دلیل وارد آمدن آسیب بخشی از جداره استوانه از روند باربری حذف می‌شود، نیروی نرمالایز شده کمناش به زیر تنش تسلیم افت می‌نماید. با مقایسه منحنی‌های ارائه شده در این شکل و شکل (۴) ملاحظه می‌شود که مشابه نمونه‌های بخش قبل، با افزایش عمق آسیب مقدار بار کمناش برای نمونه‌های مورد بررسی کاهش می‌یابد. این در حالی است که افزایش لاغری جداره مقطع علاوه بر کاهش ظرفیت باربری نهایی عضو، رفتار مقطع در محدوده پس کمناش را نیز تحت تاثیر قرار داده و افت مقاومت نمونه پس از بروز کمناش را تشدید نموده است. برای بررسی بیشتر، تحلیل‌ها برای پنج دسته نمونه با مقادیر لاغری جداره متفاوت انجام و بیشینه ظرفیت نرمال شده (نسبت به ظرفیت نمونه سالم) آنها در شکل (۷ الف) نمایش داده شده است.

شکل ۷. بیشینه ظرفیت نرمال شده نمونه‌های با لاغری جداره متفاوت

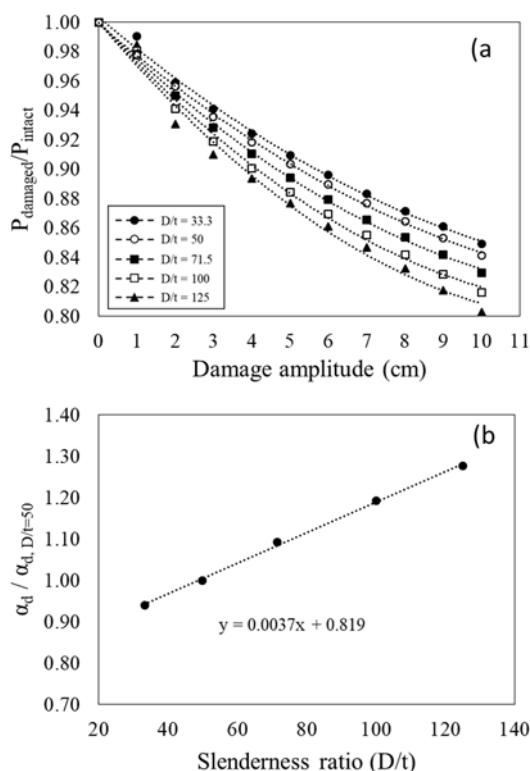


Fig. 7. Normalized buckling load of models with varying shell slenderness ratio

شکل ۸. نمودار نیرو-جابجایی نرمال شده برای لاغری جداره متفاوت (d=5 cm)

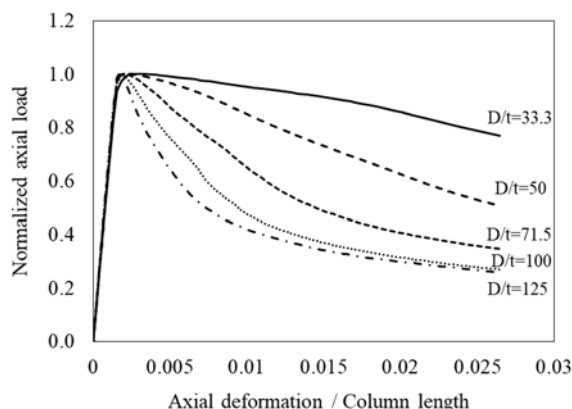


Fig. 8. Normalized Load-displacement curves for model with varying shell slenderness ratio (d=5 cm)

۳-۳- تاثیر محل جسم برخورد کننده

برای تعیین تاثیر محل جسم برخورد کننده با عضو محوری مورد بررسی، ارتفاع برخورد جسم کروی به ستون استوانه‌ای در سه حالت $L/2$ ، $L/3$ و $L/6$ در نظر گرفته شده است. شکل (۹) دسته نمودارهای نیرو-جابجایی مربوط به نمونه‌های با محل آسیب متفاوت و دو مقدار لاغری جداره ($D/t=100$ ، $D/t=50$) را نمایش می‌دهد. با توجه به شکل، محل وارد آمدن آسیب تاثیر اندکی بر مقدار بار کمانشی عضو دارد. شکل (۱۰) تاثیر محل وارد آمدن آسیب بر ظرفیت نهایی نمونه‌های با عمق آسیب $d=10\text{ cm}$ را نشان می‌دهد. محور قائم نمودار میزان افزایش آسیب را نسبت به مقدار محاسبه شده از معادله ۱ ارائه می‌دهد. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که با افزایش لاغری جداره ستون، میزان تاثیر محل آسیب بر ظرفیت نهایی ستون افزایش می‌یابد.

چنانچه ملاحظه می‌شود، با افزایش ضریب لاغری جداره، آثار کاهش ناشی از وارد آمدن آسیب تشدید می‌شود. شکل (۷.ب) ضریب کاهش منحنی‌های برازش شده به دسته نمونه‌های با لاغری متفاوت در شکل (الف) را نسبت به منحنی مربوط به لاغری $D/t=50$ نمایش می‌دهد. بر این اساس، تاثیر لاغری بر کاهش ظرفیت نمونه‌های آسیب دیده به صورت زیر است:

$$\alpha_s = 0.0037 \lambda_s + 0.819, \quad \lambda_s = \frac{D}{t} \quad (3)$$

در این رابطه α_s نسبت کاهش ظرفیت نمونه با لاغری داده شده به کاهش ظرفیت نمونه با لاغری ۵۰ بوده و λ_s نسبت قطر استوانه، D ، به ضخامت جداره، t ، می‌باشد. چگونگی استفاده از این پارامتر در بند ۴ مورد بحث قرار گرفته است.

برای بررسی تاثیر لاغری جداره بر رفتار پس کمانشی عضو آسیب دیده، منحنی نیرو-جابجایی نمونه‌های با آسیب $d=5\text{ cm}$ و لاغری‌های مختلف در شکل (۸) ترسیم شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود، افزایش لاغری جداره، باعث افزایش شیب نزولی نمودار در ناحیه پس کمانشی می‌شود.

برای داشتن معیاری که نشان دهنده رفتار پس کمانشی عضو باشد، از میزان کاهش باربری عضو در دو برابر تغییرشکل متناظر با بار کمانش استفاده شده است. برای محاسبه پارامتر یاد شده، رابطه زیر به داده‌های موجود در شکل (۸) برازش یافته است:

$$\beta_s = 0.0308 \left(\frac{\lambda_s}{50} \right)^{2.394}, \quad \lambda_s = \frac{D}{t} \quad \text{معادله ۴}$$

که در آن β_s نسبت کاهش ظرفیت عضو در دو برابر تغییرشکل متناظر بار کمانش به ظرفیت کمانش عضو است. استفاده از این پارامتر در بند ۴ مورد بحث قرار گرفته است.

$$\lambda_l = l/L \quad -0.0144 \cdot \lambda_s \cdot \lambda_l + 0.57$$

در این رابطه λ_s نسبت قطر استوانه، D ، به ضخامت جداره، t ، و λ_l نسبت محل وارد آمدن آسیب، l ، به طول ستون، L ، است. استفاده از این پارامتر نیز در بند ۴ مورد بحث قرار گرفته است. با توجه به شکل (۹) رفتار پس کمانشی نمونه‌ها متأثر از محل آسیب بوده و هر چه محل آسیب به تکیه‌گاه نزدیک‌تر باشد شیب منحنی نیرو-جابجایی نمونه در محدوده زوال مقاومت بیشتر است. شکل کمانش یافته سه نمونه با مقدار آسیب $d=5$ cm مطابق محل آسیب متفاوت، در شکل (۱۱) ارائه شده است. مطابق شکل، با نزدیک‌تر شدن محل آسیب به تکیه‌گاه، حلقه کمانش در نزدیکی تکیه‌گاه دورتر حذف و کل تغییرشکل‌ها در سمت تکیه‌گاه نزدیک متمرکز می‌شود که زوال مقاومت بیشتر را در پی دارد. برای تعیین میزان تاثیر محل آسیب بر ظرفیت پسماند (ظرفیت در دو برابر تغییرشکل کمانش) نمونه‌ها، مقدار کاهش ظرفیت پسماند نمونه‌های با لاغری جداره متفاوت و آسیب $d=5$ cm نسبت به حالت مشابه با آسیب میانی محاسبه و در شکل (۱۲) ترسیم شده است. مطابق شکل، مقدار کاهش تابعی از محل آسیب در طول عضو است.

شکل ۱۱ مقایسه شکل کمانش یافته نمونه‌ها با محل آسیب متفاوت

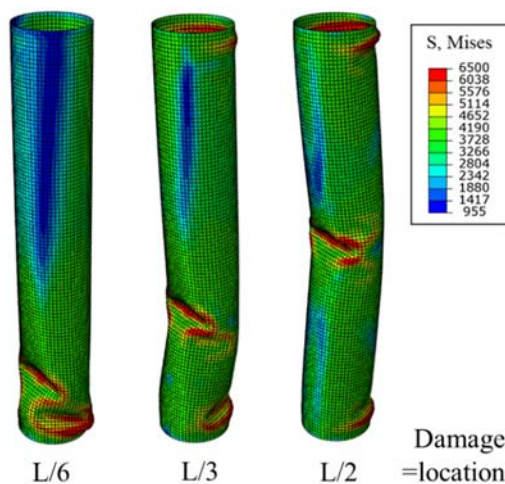


Fig. 11. Buckled shape of models with varying damage location

شکل ۹. مقایسه نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ها با محل آسیب متفاوت

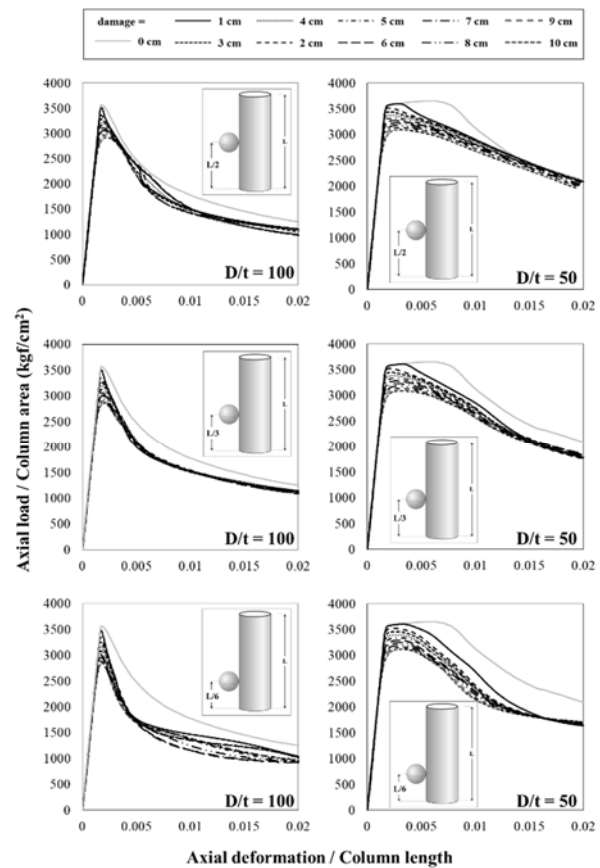


Fig. 9. Load-displacement curves for model with varying damage location

شکل ۱۰ مقایسه شکل کمانش یافته نمونه‌ها با محل آسیب متفاوت

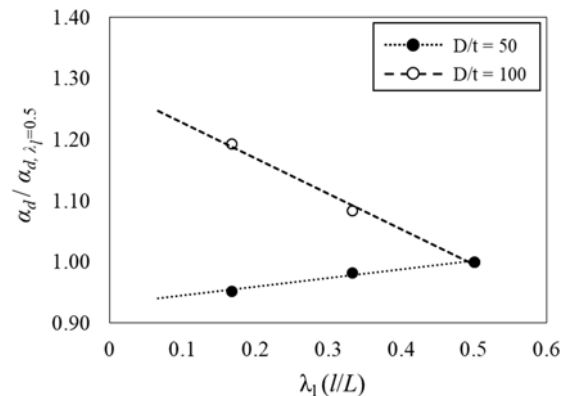


Fig. 10. Effect of damage location on the ultimate strength of specimens ($d=5$ cm)

معادله زیر با برازش رابطه‌ای بر نمودارهای ارائه شده در شکل (۱۰) بدست آمده و برای تعیین میزان تاثیر محل وارد آمدن آسیب بر ظرفیت نهایی نمونه‌ها نسبت به حالت ستون با آسیب میانی استفاده خواهد شد:

$$\alpha_l = 0.86 \cdot \lambda_l + 0.0072 \cdot \lambda_s \quad \lambda_s = D/t \quad (5)$$

شکل ۱۳ تاثیر طول ستون بر نمودار نیرو-جابجایی عضو (D/t=50)

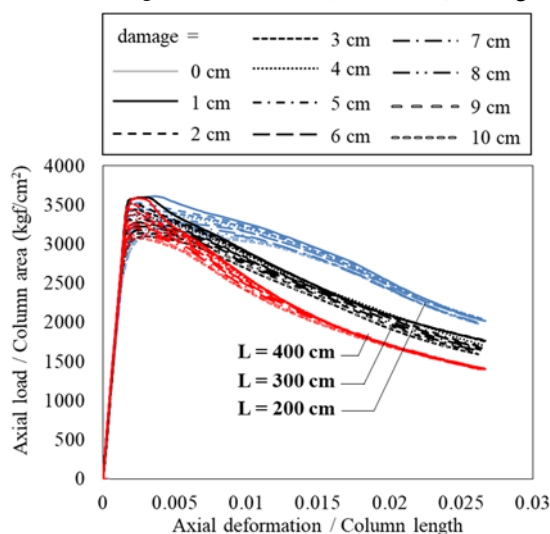


Fig. 13. Effect of column length on the load-displacement curve (D/t=50)

همچنین، مقایسه شکل کمانش یافته برای نمونه‌های با طول متفاوت در شکل (۱۴) ارائه شده است. با توجه به شکل (۱۳) و (۱۴)، ظرفیت باربری و شکل کمانش یافته هر سه دسته نمونه مشابه هم است. لیکن مطابق توضیح قبل، رفتار پس کمانشی نمونه‌ها متأثر از طول عضو مورد بررسی است.

باتوجه به شکل، دسته‌نمودارهای مربوط به نمونه‌های با طول کم به دلیل سختی خمشی بیشتر دارای شیب نزولی کمتری نسبت به دسته نمودارهای با طول بیشتر می‌باشند. رابطه‌ی زیر به داده‌های موجود برازش شده و تاثیر طول عضو بر ظرفیت پسماند نمونه (ظرفیت در دو برابر تغییر شکل کمانش) را نسبت به حالت $L/D = 6$ نشان می‌دهد:

$$\beta_L = 1.029 - 0.029 \left(\frac{\lambda_L}{6} \right)^{2.069}, \quad \lambda_L = \frac{L}{D} \quad (7)$$

در این رابطه λ_L نسبت طول عضو مربوطه به قطر آن می‌باشد. استفاده از این پارامتر در بند ۴ مورد بحث قرار گرفته است.

شکل ۱۲ تاثیر محل آسیب و لاغری جداره عضو بر میزان کاهش ظرفیت پسماند

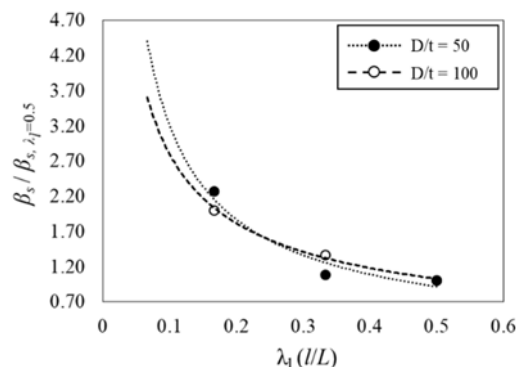


Fig. 12. Effect of shell slenderness ratio and damage location on the post buckling strength of specimens

بدین ترتیب رابطه زیر را می‌توان از برازش به داده‌های موجود

تعیین نمود:

$$\beta_l = 0.664 \cdot \lambda_l^{-0.624}, \quad \lambda_l = \frac{l}{L} \quad (6)$$

که در آن β_l نسبت کاهش ظرفیت پسماند نمونه با محل آسیب داده شده به کاهش ظرفیت نمونه با آسیب میانی بوده و سایر پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند. چگونگی استفاده از این پارامتر در بند ۴ مورد بحث قرار گرفته است.

۴-۳- تاثیر طول عضو محوری

با توجه به معادله ۲، از لحاظ تئوریک طول عضو فشاری مورد بررسی تاثیری بر بار کمانش آن نخواهد داشت. برای نمونه‌های آسیب دیده هم می‌توان گفت طول عضو مربوطه تاثیر چندانی بر بار کمانش نداشته باشد. لیکن از آنجا که پس از بروز کمانش، رفتار خمشی عضو نیز در ظرفیت باربری دخیل است، پس می‌توان انتظار داشت که طول عضو مربوطه بر رفتار پس کمانشی تاثیرگذار باشد. شکل (۱۳) تاثیر طول عضو بر نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ها را در سه حالت با طول کم ($L=200$ cm) یا $L/D=6$ ، متوسط ($L=300$ cm یا $L/D=4$) و زیاد ($L=400$ cm) یا $D/t=8$ نشان می‌دهد.

شکل ۱۵. نمای بالا از تغییر شکل حاصل در اثر برخورد جسم با شعاع متفاوت

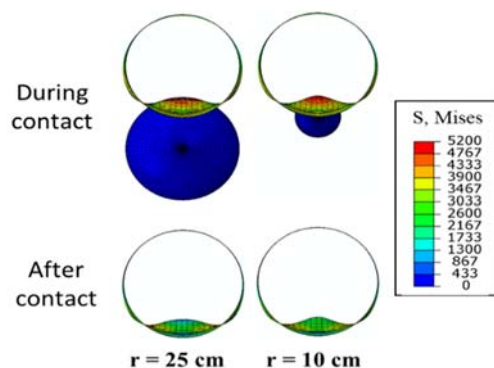


Fig. 15. Top view of the deformation profile caused by hitting objects of different radius

شکل ۱۶ مقایسه شکل کمناش یافته برای نمونه‌های با شعاع متفاوت جسم برخورد کننده

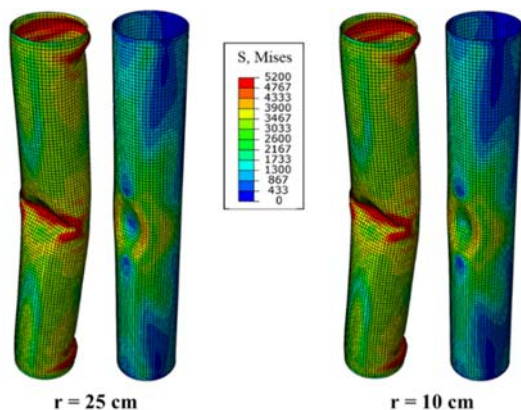


Fig. 16. Buckled shape of models with hitting objects of different radius

برای بررسی بیشتر موضوع، نمودارهای نیرو-جابجایی چند نمونه با شعاع متفاوت جسم برخورد کننده در شکل ۱۷ نمایش داده شده است. نمونه‌های موجود در این شکل شامل: چهار نمونه با $D/t = 50$ و آسیب میانی، چهار نمونه با $D/t = 100$ و آسیب میانی و چهار نمونه با $D/t = 50$ و آسیب در فاصله‌ی یک-ششم طول می‌باشند. منحنی‌های خاکستری برای نمونه‌های با شعاع جسم برخورد کننده $r=10$ cm و منحنی‌های مشکی برای نمونه‌های با شعاع جسم برخورد کننده $r=25$ cm می‌باشند. همچنین منحنی‌ها برای دو مقدار آسیب $d=1$ cm و $d=5$ cm ارائه شده‌اند. با توجه به شکل، برای هیچ‌کدام از حالات مذکور شعاع جسم برخورد کننده تاثیری بر منحنی‌های نیرو-جابجایی

شکل ۱۴. مقایسه شکل کمناش یافته برای نمونه‌های با طول متفاوت

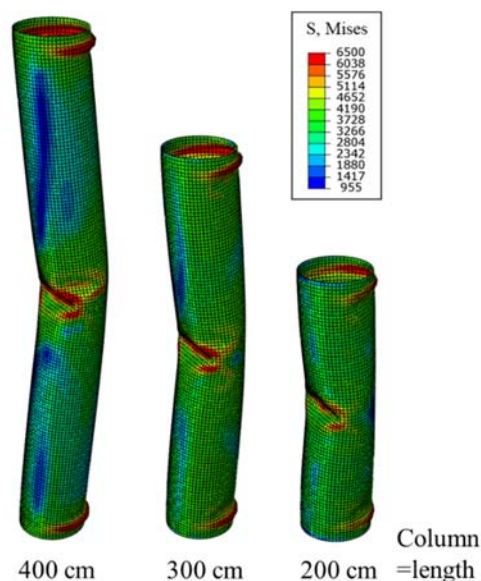


Fig. 14. Buckled shape of models with varying length

۳-۵- تاثیر شعاع جسم برخورد کننده

پارامتر بعدی مورد مطالعه در تحقیق حاضر، شعاع جسم برخورد کننده با عضو فشاری مورد بررسی می‌باشد. شکل ۱۵ نمای بالا از لحظه‌ی برخورد و لحظه‌ی پس از برخورد را برای دو نمونه با شعاع جسم برخورد کننده متفاوت نمایش می‌دهد. برای هر دو نمونه، عمق آسیب وارد شده با هم برابر می‌باشد. چنانچه در شکل ملاحظه می‌شود، علیرغم متفاوت بودن شعاع جسم برخورد کننده، پروفیل تغییر شکل ایجاد شده پس از برخورد برای هر دو حالت تقریباً مشابه هم بوده و تفاوت بسیار جزئی در انحنا و شیب ناحیه‌ی بین بیشترین و کمترین تغییر شکل در دو نمونه ملاحظه می‌شود.

شکل ۱۶، نمای تغییر شکل یافته‌ی نمونه‌های مذکور را پس از بروز کمناش نمایش می‌دهد. چنانچه در شکل ملاحظه می‌شود شکل کمناش یافته‌ی هر دو نمونه تا حد زیادی مشابه هم بوده و تفاوتی بین آنها ملاحظه نمی‌گردد؛ بدین صورت که طی روند افزایش تغییر شکل‌ها و بروز کمناش، اندک تفاوت موجود در پروفیل تغییر شکل دو نمونه نیز حذف شده و تغییر شکل نهایی نمونه‌ها مشابه هم می‌گردد.

عمدتها متأثر از لاغری جداره استوانه، محل آسیب و طول عضو است. برای لحاظ کردن تأثیر پارامترهای یاد شده، ضرایب β_s , β_l و β_L به داده‌های موجود برازش شده و معرفی شد. با استفاده از این پارامترها، ظرفیت پسماند نمونه آسیب دیده نسبت به ظرفیت نهایی آن به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{P_{res,damaged}}{P_{cr,damaged}} = 1 - \beta_s \cdot \beta_l \cdot \beta_L \quad (9)$$

که در آن $P_{res,damaged}$ ظرفیت پسماند عضو آسیب دیده در دو برابر تغییرشکل کمناش است. برای بررسی دقت رابطه ۸ و ۹، نتایج حاصل از پیش‌بینی آن‌ها با داده‌های عددی حاصل از تحلیل ۳۶۰ نمونه با پارامترهای مختلف (که در بخش‌های قبل شرح داده شد) مقایسه شده است. شکل (۱۸) نتایج حاصل از این مقایسه را نمایش می‌دهد. میانگین، انحراف از معیار و بیشینه قدر مطلق خطای ناشی از استفاده از رابطه ۸ به ترتیب برابر با ۰/۷، ۰/۵ و ۲ درصد است. این در حالیست که به دلیل وابسته بودن ظرفیت پسماند به تغییرشکل‌های پس کمناشی، خطای ناشی از برآورد آن بیشتر و مقادیر متناظر برای رابطه ۹، به ترتیب برابر با ۲/۸، ۲/۴ و ۹ درصد است.

شکل ۱۸. مقایسه پیش‌بینی‌های معادله ۸ و ۹ با نتایج تحلیل عددی

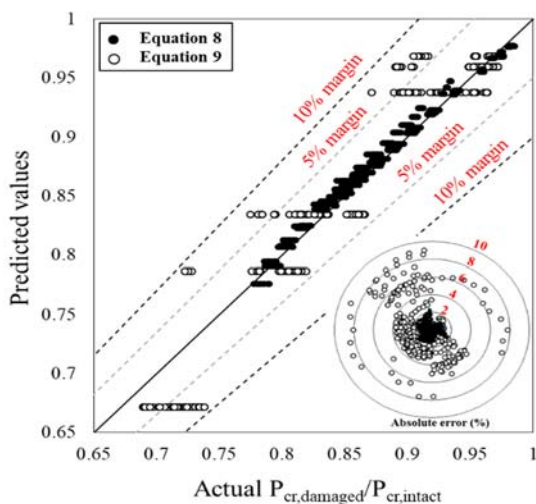


Fig. 18. Comparing predictions of Eq. 8 and 9 with numerical results

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش ظرفیت باربری محوری ستون‌های استوانه‌ای در اثر آسیب وارد شده از سوی یک جسم کروی، به صورت

عضو نداشته و ظرفیت نهایی و رفتار پس کمناشی نمونه‌های آسیب دیده توسط جسم با شعاع متفاوت تقریباً منطبق بر هم می‌باشد. بدین ترتیب می‌توان نتیجه‌گیری نمود که عمق آسیب، لاغری جداره‌ی استوانه، محل آسیب و طول عضو، پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار کمناشی استوانه‌های آسیب دیده تحت بار محوری می‌باشند و شعاع جسم برخورد کننده تأثیر چندانی بر ظرفیت این نمونه‌ها ندارد.

شکل ۱۷. نمودارهای نیرو-جابجایی برای نمونه‌های با شعاع متفاوت جسم کروی

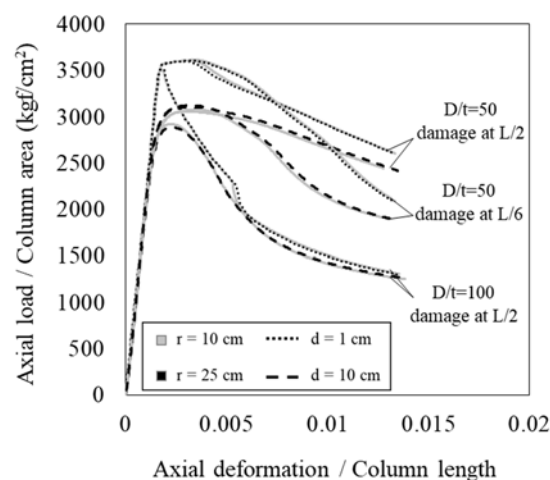


Fig. 17. Load-displacement curves for models with varying radius of hitting object

۴- بحث و بررسی

بر اساس مطالب بیان شده در بخش‌های قبل، ظرفیت کمناشی عضو آسیب دیده عمده‌تأثیر از عمق آسیب وارد شده، لاغری جداره استوانه و محل آسیب است. برای لحاظ نمودن تأثیر سه پارامتر یاد شده، ضرایب α_d , α_s و α_l به داده‌های موجود برازش شده و معرفی شد. بدین ترتیب، با استفاده از سه ضریب یاد شده می‌توان ظرفیت کمناشی نمونه آسیب دیده را نسبت به نمونه سالم به صورت زیر محاسبه نمود:

$$\frac{P_{cr,damaged}}{P_{cr,intact}} = 1 - \alpha_d \cdot \alpha_s \cdot \alpha_l \quad (8)$$

که در آن $P_{cr,damaged}$ ظرفیت کمناشی نمونه آسیب دیده و $P_{cr,intact}$ ظرفیت کمناشی نمونه سالم است. همچنین در بخش‌های قبل ملاحظه شد که ظرفیت پسماند عضو آسیب دیده در محدوده پس کمناشی (ظرفیت در دو برابر تغییرشکل کمناش)

۶. تقدیر و تشکر

بدینوسیله از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی برای حمایت از این پژوهش سپاسگزاری به عمل می‌آید. همچنین، زحمات هیات داوران و اعضای تیم علمی نشریه در ارتقای کیفیت مقاله و انتشار آن شایسته قدردانی است.

۷. مراجع

- [1] Timoshenko S.P., Gere J.M. 1961 Theory of Elastic Stability, 2nd ed. New York: McGraw-Hill.
- [2] Ugural AC. 1981 Stresses in Plates and Shells, New York: McGraw-Hill.
- [3] Akrami V., Erfani S. 2017 An analytical and numerical study on the buckling of cracked cylindrical shells. *Thin-Walled Structures*, 119, 457-469.
- [4] Zhao C., Niu J., Zhang Q., Zhao C., Xie J. 2018 Buckling behavior of a thin-walled cylinder shell with the cutout imperfections. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 26(18), 1536-1542.
- [5] Alsalah A., Holloway D., Ghazijahani T.G. 2017 Recovery of capacity lost due to openings in cylindrical shells under compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 137, 169-179.
- [6] Rastgar M., Showkati H. 2018 Buckling behavior of cylindrical steel tanks with concavity of vertical weld line imperfection. *Journal of Constructional Steel Research*, 145, 289-299.
- [7] Ghazijahani T.G., Jiao H., Holloway D. 2015 Plastic buckling of dented steel circular tubes under axial compression: An experimental study. *Thin-Walled Structures*, 92, 48-54.
- [8] Hutchinson J., Muggeridge D., Tennyson R. 1971 Effect of a local axisymmetric imperfection on the buckling behavior of a circular cylindrical shell under axial compression. *AIAA journal*, 9(1), 48-52.
- [9] Naghipour M., Ezzati M., Elyasi M. 2018 Analysis of high-strength pressurized pipes (API-5L-X80) with local gouge and dent defect. *Applied Ocean Research*, 78, 33-49.
- [10] Naghipour M., Ezzati M., Elyasi M. 2018 Experimental investigation of pressurized steel pipes with mechanical defect under axial compression. *Modares Mechanical Engineering*, 18(5): 172-181.
- [11] Ezzati M., Naghipour M., Zeinoddini M., Zandi A.P., Elyasi M. 2020 Strain ratcheting

پارامتریک و به روش اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای مورد بررسی شامل: عمق آسیب، لاغری جداره استوانه، محل آسیب، طول عضو محوری و شعاع جسم برخورد کننده بودند. بر اساس نتایج بدست آمده:

- با افزایش عمق آسیب مقدار بار کمانش نمونه کاهش می‌یابد. این در حالیست که شکل کمانش یافته نمونه‌ها عمدتاً مشابه بوده و تفاوت چندانی ندارند. برای نمونه‌های با نسبت $D/t=50$ وارد آمدن آسیب با عمق ۲۰٪ قطر استوانه، ظرفیت کمانشی نمونه را تا ۱۶٪ نمونه سالم کاهش می‌دهد.
- لاغری جداره عضو آسیب دیده تاثیر مستقیم بر ظرفیت نهایی و رفتار پس‌کمانشی آن تحت بار محوری دارد. بر اساس نتایج بدست آمده، افزایش لاغری جداره استوانه از ۵۰ به ۱۲۵، باعث ۳۰٪ کاهش بیشتر در بار کمانشی نمونه می‌شود.
- برای نمونه‌های با لاغری کم ($D/t=50$)، تغییر محل آسیب تاثیر چندانی بر ظرفیت کمانشی عضو ندارد. این در حالیست که با افزایش لاغری جداره، نزدیکتر شدن محل آسیب به تکیه‌گاه می‌تواند بار کمانش را تا ۲۰٪ بیشتر کاهش دهد.
- ظرفیت باربری و شکل کمانش یافته نمونه‌های با نسبت متفاوت طول به قطر، L/D ، عمدتاً مشابه هم هستند. لیکن رفتار پس‌کمانشی نمونه‌ها متأثر از طول عضو مورد بررسی است. نمونه‌های با نسبت L/D کم به دلیل سختی خمشی بیشتر، دارای شیب نزولی کمتری در محدوده پس‌کمانشی نسبت به نمونه‌های با نسبت L/D بیشتر است.
- شعاع جسم برخورد کننده تاثیر چندانی بر ظرفیت کمانشی یا پس‌کمانشی نمونه آسیب‌دیده ندارد. برای نمونه آسیب دیده توسط جسم با شعاع متفاوت ولی عمق آسیب مشابه، تفاوت موجود در پروفیل آسیب هنگام روند افزایش تغییرشکل‌ها حذف شده و تغییرشکل نهایی نمونه‌ها مشابه هم می‌شود.
- در خاتمه، با برآزش به نتایج تحلیل‌ها، روابطی برای تعیین ظرفیت کمانشی و ظرفیت پسماند اعضای محوری یاد شده ارائه شده است که می‌تواند در روند طراحی یا ارزیابی ثانویه نمونه‌های آسیب دیده مورد استفاده قرار گیرد.

- [14] Draid Z., Bui T.T., Limam A., Tran H.V., Bennani A. 2018 Buckling Behavior of Metallic Cylindrical Shell Structures Strengthened with CFRP Composite. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 1-13.
- [15] Tajdari M., Azimi M., Khorram M., Eskandari J. 2013 Numerical and Experimental Investigations on Buckling of Steel Cylindrical Shells With triangular Cutout Subject to Axial Compression. *Modares Mechanical Engineering*, 13(1), 24-37.
- [16] Ifayefunmi O. 2016 Buckling behavior of axially compressed cylindrical shells: Comparison of theoretical and experimental data. *Thin-walled structures*, 98, 558-564.
- failure of dented steel submarine pipes under combined internal pressure and asymmetric inelastic cycling. *Ocean Engineering*, available online (in press).
- [12] Ghaemdoost M.R., Narmashiri K., Yousefi O. 2016 Structural behaviors of deficient steel SHS short columns strengthened using CFRP. *Construction and Building Materials*, 126, 1002-1011.
- [13] Vakili M., Showkati H. 2015 Experimental and numerical investigation of elephant foot buckling and retrofitting of cylindrical shells by FRP. *Journal of Composites for Construction*, 20(4), 04015087.

A parametric study on the axial load carrying capacity of dented cylindrical columns

Vahid Akrami^{1*}, Meysam Norouzi², Sasan Teymour-Moghaddam²

1- Assistant Professor, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

2- MSc. graduate, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

3. MSc. graduate, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

*v.akrami@uma.ac.ir

Abstract

The Presence of defects in the compressive structural members may reduce their load-carrying capacity to a large extent. These defects may be in the form of cracks, corrosion, perforation, or dents existing on the smooth surface of the member. In most cases, the impact of an external object is the main cause of these damages. For example, tubular sections of offshore platforms which are mostly under axial loads, may be damaged with the collision of supply vessels. Similarly, the columns of bridges and buildings, may be hit by heavy moving vehicles. The Existence of the mentioned defects in compressive members with circular cross-sections may cause premature failure of these structural elements due to local buckling followed by the member's overall instability. Hence, the effect of these damages on the buckling strength of tubular columns, and the effect of different influencing parameters should be studied in depth. This study presents a parametric investigation on the axial load-carrying capacity of cylindrical columns damaged by a spherical indenter. For this purpose, the numerical models were generated in general purpose finite element software "Abaqus" and verified against results of two axial compression tests on intact and damaged thin-walled cylinders. The studied parameters included depth of the damage, shell slenderness ratio, location of the damage, length of the axial member, and radius of the indenter object. The analysis results showed that, the depth of the damage, shell slenderness ratio, and the damage location were the parameters affecting the buckling capacity of the damaged cylinders under axial load. The increase in damage depth or shell slenderness ratio decreased the buckling load of the member. On the contrary, the buckled shape of the members with different damage depth values or shell slenderness ratios was almost identical. The post-buckling behavior of the studied specimens was affected by the shell slenderness ratio, the damage location, and the length of the compressive member. As the shell slenderness ratio or length of the member increased, the member strength in the post-buckling range experienced more rapid reduction. Also, as the damage became closer to the one of supporting ends, the buckling ring at the farther support vanished while the buckling ring at the closer support became more critical, resulting in an increased strength reduction. The radius of the indenter object had a negligible effect on the buckling capacity and post-buckling behavior of the specimens. For samples with the same damage depth and different radius of the indenter object, the damage profile difference was very small. This small difference vanished during the buckling process, and the final deformation profile for the samples became almost identical. Finally, a regression analysis was conducted on the results of analyses considering the effect of different parameters, and two predictive equations were proposed to determine the buckling and residual capacity of the studied members as functions of influencing parameters. The evaluations performed to estimate the accuracy of the proposed equations showed that they have good accuracy and provide reliable predictions for design re-checking of damaged cylindrical members subjected to axial compression.

Keywords: Cylindrical column, damage, buckling strength, post-buckling behavior, finite element analysis