

مجله علمی – پژوهشی

مهندسی عمران مدرس

دوره بیست یکم، شماره 4، سال1399

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

وحید اکرمی1\*، میثم نوروزی2، ساسان تیمورمقدم3

1. استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

2. کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

3. کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

**\*v.akrami@uma.ac.ir**

**تاریخ دریافت: 30/07/99 تاریخ پذیرش: 20/11/99**

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 سکوهای دریایی یا پایه پل‌ها و ساختمان‌ها که عمدتا 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 کمانش موضعی و در ادامه کمانش 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 کمانشی استوانه های آسیب دیده تحت بار محوری هستند. بر همین اساس، با افزایش عمق آسیب و لاغری جداره استوانه مقدار بار کمانش نمونه کاهش می‌یابد. این در حالی است که شکل کمانش یافته نمونه‌های با عمق آسیب و لاغری جداره متفاوت بیشتر مشابه هم بوده و تفاوت چندانی با هم ندارند. رفتار پس کمانشی این اعضا متاثر 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 تاثیری 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 تاثیر 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 می توان از این روابط در روند طراحی یا ارزیابی ثانویه نمونه‌های آسیب دیده استفاده نمود.

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

1. مقدمه

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 سکوهای دریایی یا پایه پل‌ها و ساختمان‌ها که عمدتا 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 تاثیر پارامتر­های هندسی فرورفتگی ایجاد شده در اثر برخورد­های احتمالی بر نوع شکست عضو بررسی شود.

مسأله 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 2) [1] که برای استوانه­های سالم با نسبت طول به قطر کمتر از 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 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 عمدتا 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[[1]](#footnote-1) [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[[2]](#footnote-2) [4] آثار نقص هندسی بر رفتار کمانشی لوله‌های جدار نازک تحت فشار را به صورت آزمایشگاهی و 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 مود­های 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 عمدتا در اثر همزمانی فشار داخلی و نیروهای محوری رخ می­دهد. درایدی و همکاران[[3]](#footnote-3) [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.

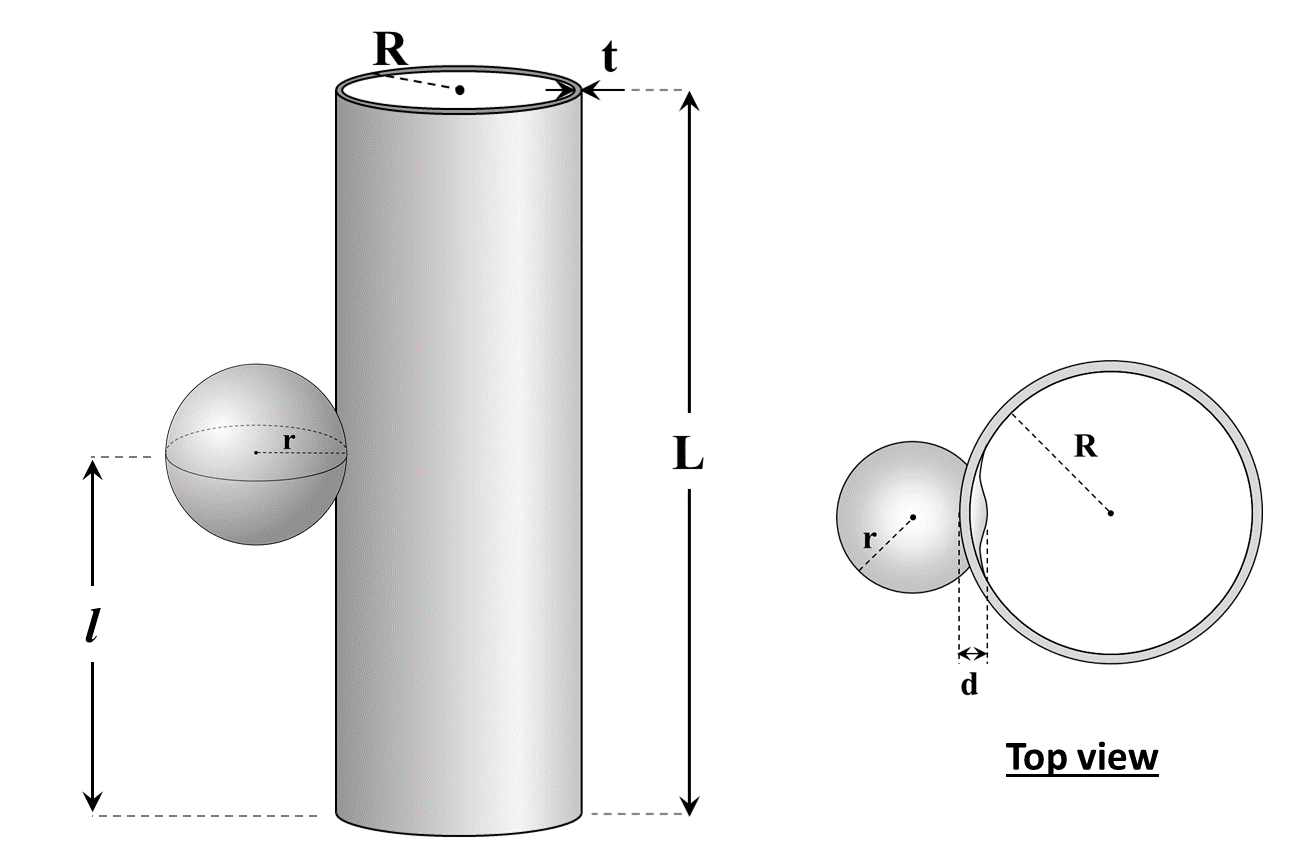
1. جزئیات مدلسازی

2-1- هندسه نمونه‌های مورد بررسی

هندسه عضو محوری مورد مطالعه و جسم کروی مورد استفاده برای ایجاد آسیب در شکل (1) نمایش داده 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 می شود. طول نمونه مرجع برابر با 3 متر و قطر خارجی آن برابر با 50 سانتی‌متر لحاظ شده است (6=L/D).

برای بررسی تاثیر طول ستون بر رفتار نمونه­ها، دو مقدار دیگر برای نسبت L/D، یکی برای ستون کوتاه‌تر (4L/D=) و دیگری برای ستون بلند‌تر (8L/D=)، در تحلیل‌ها استفاده قرار گرفته است. لاغری استوانه مربوطه به صورت پارامتریک بین دو مقدار 3/33=D/t و 125=D/t 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 6/L، 3/L و 2/L بررسی شده است. مقدار آسیب (عمق فرورفتگی) از 1 تا 10 سانتی‌متر (با گام 1 سانتی‌متر) متغییر در نظر گرفته شده است.

**شکل 1** هندسه عضو محوری و جسم کروی مورد استفاده برای آسیب

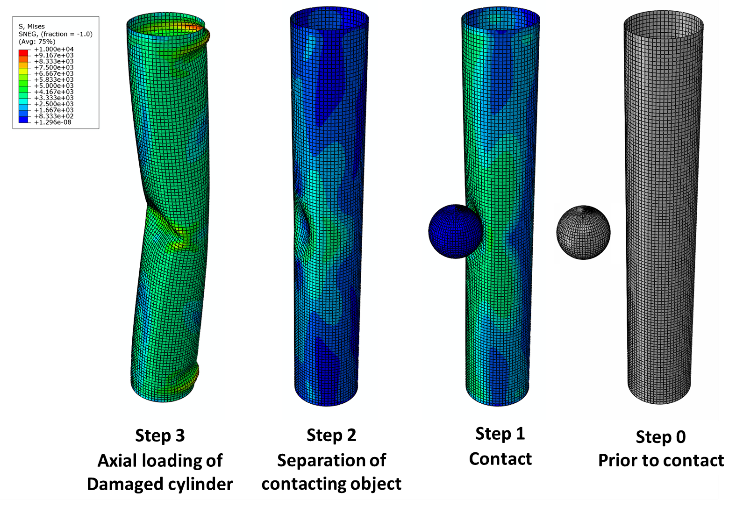


**Fig. 1.** Configuration of tubular member and hitting object

2-2- مدلسازی المان محدود

شبیه‌سازی مدل‌های المان محدود توسط نرم‌افزار آباکوس[[4]](#footnote-4) 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 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 شکل‌پذیر با مدول الاستیسیته GPa201 و ضریب پواسون 3/0 مدلسازی شده است. تنش تسلیم مصالح برابر با MPa345 و شیب نمودار تنش-کرنش در ناحیه سخت شوندگی مصالح برابر با 1% لحاظ شده است. برای هر نمونه، تحلیل در سه‌گام شبه-استاتیکی نشان داده شده در شکل (2)، 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[[5]](#footnote-5) تعریف شده است.

**شکل 2.** 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، تغییرشکل 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. درستی‌آزمایی مدل­های ایجاد شده در نرم­افزار در بخش بعد ارائه شده است.

2-3- درستی‌آزمایی مدل­ها

برای درستی‌آزمایی نتایج تحلیل­های اجزای محدود، از داده‌های آزمایشگاهی گزارش شده در دو مرجع 16] و [7 استفاده شده است. نمونه مورد آزمایش در اولین پژوهش استوانه فولادی بدون آسیب با نسبت قطر به ضخامت، 50D/t=، طول mm8/111 و میانگین ضخامت جداره برابر با 02/2 میلی‌متر بوده است. میانگین مدول الاستیسیته مصالح برابر با GPa4/241، میانگین حد پایین و بالای تنش تسلیم به ترتیب MPa 5/296 و MPa 1/322 و میانگین مقاومت کششی نهایی برای فولاد مصرفی MPa 4/374 گزارش شده است. شکل (3 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، 6/47D/t=، طول mm 220 و ضخامت جداره برابر با 6/1 میلی‌متر بوده است. آسیب به صورت فرورفتگی افقی با عمق mm 4 و عرض mm 37 بوده و فاصله آن از تکیه‌گاه پایین mm 45 تنظیم شده است. مدول الاستیسیته مصالح برابر با GPa3/216، تنش تسلیم برابر با MPa 307 و مقاومت کششی نهایی آن MPa 2/360 گزارش شده است. شکل (3 ب) منحنی بار-تغییر طول محوری را برای این نمونه نمایش می­دهد.

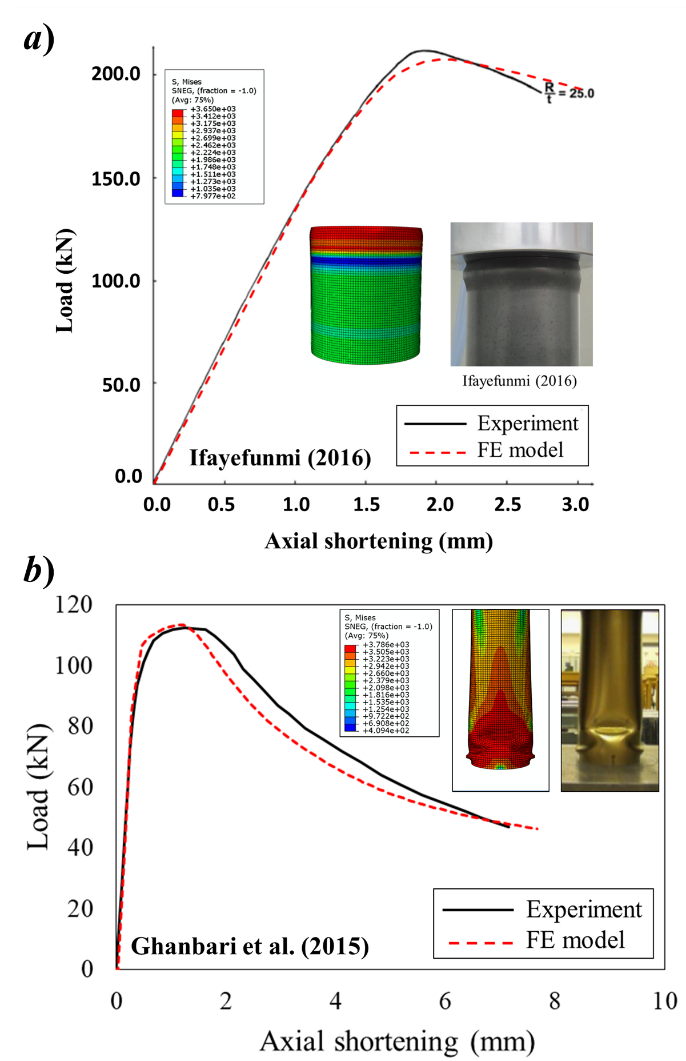
در ادامه، نمونه­های مورد آزمایش بر اساس ویژگی‌های هندسی و مشخصات مکانیکی شرح داده شده، به صورت عددی شبیه‌سازی شده و تحلیل شده‌اند. برای انجام مقایسه، منحنی نیروی وارد شده تغییر طول محوری بدست آمده از تحلیل نمونه‌های عددی به همراه شکل کمانش یافته آن‌ها در شکل (3) ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، شیب منحنی­ها در محدوده خطی، ظرفیت کمانشی، تغییرشکل متناظر نقطه کمانش، رفتار پس کمانشی و همچنین شکل کمانش برای نمونه­های عددی و آزمایشگاهی بسیار نزدیک به هم است.

1. نتایج

3-1- تاثیر عمق آسیب وارده

در این بخش تاثیر میزان آسیب وارد شده به عضو محوری، که با میزان فرورفتگی جسم کروی در بدنه عضو فشاری سنجیده می­شود *d*، مورد بررسی قرار می­گیرد. از آنجاکه بررسی نتایج 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 50D/t=، ضخامت جداره cm0/1t= و شعاع جسم کروی برخوردکننده برابر با cm10r= می­باشند. همچنین محل برخورد در وسط ارتفاع عضو است.

**شکل 3.** مقایسه نتایج حاصل از تست آزمایشگاهی و تحلیل المان محدود



**Fig. 3.** Comparison of experimental and numerical analysis

شکل (4) مقایسه نمودار نیرو-جابه‌جایی نمونه­ها با مقدار آسیب متفاوت را نمایش می­دهد. بار کمانش و تغییرطول نسبی نمونه­ها نیز در جدول (1) خلاصه شده است. چنانچه در این شکل ملاحظه می­شود، برای نمونه فاقد آسیب، تنش نهایی بالاتر از تنش تسلیم است. برای نمونه با آسیب cm0/1*d*= و cm0/2*d*= هنوز تنش نهایی بالاتر از تنش تسلیم است، لیکن مقدار بار 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 حالیست که تغییر طول نسبی متناظر لحظه کمانش با افزایش مقدار آسیب، افزایش می­یابد. این مسئله را عمدتا می­توان به تغییر چگونگی کمانش از حالت دفعی محوری به حالت ملایم خمشی مرتبط دانست.

**شکل 4.** نمودار نیرو-جابه‌جایی نمونه­ها با آسیب متفاوت (D/t=50)

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

**جدول 1.** مقایسه بارکمانش و تغییرطول نسبی نمونه‌ها با آسیب متفاوت

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Axial shortening ratio at buckling | |  | Buckling load (kgf/cm2) | | Damage depth (cm) |
| D/t=100 | D/t=50 | D/t=100 | D/t=50 |
| 0.0017 | 0.0053 |  | 3578 | 3680 | 0 |
| 0.0017 | 0.0029 |  | 3508 | 3598 | 1 |
| 0.0017 | 0.0019 |  | 3367 | 3519 | 2 |
| 0.0017 | 0.0019 |  | 3287 | 3444 | 3 |
| 0.0018 | 0.0024 |  | 3223 | 3380 | 4 |
| 0.0018 | 0.0024 |  | 3164 | 3326 | 5 |
| 0.0019 | 0.0025 |  | 3110 | 3274 | 6 |
| 0.0020 | 0.0026 |  | 3059 | 3226 | 7 |
| 0.0021 | 0.0028 |  | 3012 | 3182 | 8 |
| 0.0022 | 0.0029 |  | 2965 | 3140 | 9 |
| 0.0022 | 0.0030 |  | 2921 | 3096 | 10 |

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

شکل (5) حالت کمانش یافته سه نمونه با آسیب متفاوت را در انتهای تحلیل نمایش می­دهد. با توجه به این شکل، حالت کمانش یافته نمونه‌ها عمدتا مشابه هم بوده و تفاوت چندانی با هم ندارد. بدین ترتیب که تغییرشکل‌های 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 حلقه­ی کمانشی در بالا و پایین عضو و یک ناحیه با تغییرشکل­های خمشی در منطقه­ی آسیب دیده عضواست.

**شکل 5.** مقایسه شکل کمانش یافته نمونه‌ ها با آسیب متفاوت

|  |
| --- |
|  |
| **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:

|  |  |
| --- | --- |
| (1) |  |

در این رابطه *αd* نسبت کاهش ظرفیت استوانه آسیب دیده به ظرفیت استوانه سالم بوده و *λd* نسبت عمق آسیب، *d*، به قطر استوانه، *D*، است. لازم به ذکر است که با استفاده از این رابطه ظرفیت باقی مانده مقطع 1-*αd* می­باشد. چگونگی استفاده از این پارامتر در بند 4 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.

3-2- 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 کمانش الاستیک از رابطه­ی زیر محاسبه می­شود [1]:

|  |  |
| --- | --- |
| معادله 2 |  |

که در آن *E* مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، *D* قطر استوانه و *t* ضخامت جداره می­باشد. لازم به ذکر است که در صورت جایگزین نمودن مدول الاستیسته، *E* با مدول کاهش یافته مقطع، *Er*، برای کمانش پلاستیک نیز می­توان از این رابطه استفاده نمود. چنانچه در این رابطه ملاحظه می­شود، ظرفیت کمانش الاستیک مقطع رابطه­ی 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 100D/t= می­باشند، مورد بررسی قرار گرفته است. شکل 6 مقایسه نمودار نیرو-جابجایی نمونه­ها را نمایش می­دهد. بارکمانش و تغییرطول نسبی این نمونه­ها نیز در جدول 1 خلاصه شده است.

**شکل 6.** مقایسه نمودار نیرو-جابه‌جایی 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 کمانش زیر تنش تسلیم مصالح بوده است. لازم به ذکر است که حتی در این حالت نیز کمانش 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 کمانش به زیر تنش تسلیم افت می­نماید. با مقایسه منحنی­های ارائه شده در این شکل و شکل (4) ملاحظه می‌شود که مشابه نمونه‌های بخش قبل، با افزایش عمق آسیب مقدار بار کمانش 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 کمانش را نیز تحت تاثیر قرار داده و افت مقاومت نمونه پس از بروز کمانش 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 (7 الف)نمایش داده شده است.

**شکل 7.** بیشینه ظرفیت نرمال شده نمونه­های با لاغری جداره متفاوت

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

چنانچه ملاحظه می­شود، با افزایش ضریب لاغری جداره، آثار کاهشی ناشی از وارد آمدن آسیب تشدید می­شود. شکل (7.ب) ضریب کاهش منحنی­های برازش شده به دسته نمونه‌های با لاغری متفاوت در شکل (الف) را نسبت به منحنی مربوط به لاغری 50D/t= نمایش می­دهد. بر این اساس، تاثیر لاغری بر کاهش ظرفیت نمونه­های آسیب دیده به صورت زیر است:

|  |  |
| --- | --- |
| (3) |  |

در این رابطه *αs* نسبت کاهش ظرفیت نمونه با لاغری داده شده به کاهش ظرفیت نمونه با لاغری 50 بوده و *λs* نسبت قطر استوانه، *D*، به ضخامت جداره، t، می­باشد. چگونگی استفاده از این پارامتر در بند 4 مورد بحث قرار گرفته است.

برای بررسی تاثیر لاغری جداره بر رفتار پس کمانشی عضو آسیب دیده، منحنی نیرو-جابه‌جایی نمونه­های با آسیب *d*=5cm و لاغری­های مختلف در شکل (8) 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 (8) برازش یافته است:

|  |  |
| --- | --- |
| معادله 4 |  |

که در آن *βs* نسبت کاهش ظرفیت عضو در دو برابر تغییرشکل متناظر بار کمانش به ظرفیت کمانش عضو است. استفاده از این پارامتر در بند 4 مورد بحث قرار گرفته است.

**شکل 8.** نمودار نیرو-جابه‌جایی 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) |

3-3- 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 2/L، 3/L و 6/L در نظر گرفته شده است. شکل (9) دسته نمودارهای نیرو-جابه‌جایی مربوط به نمونه‌های با محل آسیب متفاوت و دو مقدار لاغری جداره (D/t=50، D/t=100) را نمایش می­دهد. با توجه به شکل، محل وارد آمدن آسیب تاثیر اندکی بر مقدار بار کمانشی عضو دارد. شکل (10) تاثیر محل وارد آمدن آسیب بر ظرفیت نهایی نمونه‌های با عمق آسیب cm10d= را نشان می­دهد. محور قائم نمودار میزان افزایش آسیب را نسبت به مقدار محاسبه شده از معادله 1 ارائه می­دهد. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که با افزایش لاغری جداره ستون، میزان تاثیر محل آسیب بر ظرفیت نهایی ستون افزایش می‌یابد.

**شکل 9.** مقایسه نمودار نیرو-جابه‌جایی نمونه­ها با محل آسیب متفاوت

|  |
| --- |
|  |
| **Fig. 9.** Load-displacement curves for model with varying damage location |
| **شکل 10** 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 (10) 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:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| (5) |  |  |

در این رابطه *λs* نسبت قطر استوانه، *D*، به ضخامت جداره، t، و *λl* نسبت محل وارد آمدن آسیب، *l*، به طول ستون، *L*، است. استفاده از این پارامتر نیز در بند 4 مورد بحث قرار گرفته است.

با توجه به شکل (9) رفتار پس کمانشی نمونه­ها متاثر از محل آسیب بوده و هر چه محل آسیب به تکیه‌گاه نزدیک‌تر باشد شیب منحنی نیرو-جابه‌جایی نمونه در محدوده زوال مقاومت بیشتر است. شکل کمانش یافته سه نمونه با مقدار آسیب *d*=5 cm و محل آسیب متفاوت، در شکل (11) 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=5cm نسبت به حالت مشابه با آسیب میانی محاسبه و در شکل (12) ترسیم شده است. مطابق شکل، مقدار کاهش تابعی از محل آسیب در طول عضو است.

شکل 11 مقایسه شکل کمانش یافته نمونه ها با محل آسیب متفاوت

|  |
| --- |
|  |
| **Fig. 11.** Buckled shape of models with varying damage location |

**شکل 12** 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:

|  |  |
| --- | --- |
| (6) |  |

که در آن *βl*، نسبت کاهش ظرفیت پسماند نمونه با محل آسیب داده شده به کاهش ظرفیت نمونه با آسیب میانی بوده و سایر پارامترها قبلا تعریف شده­اند. چگونگی استفاده از این پارامتر در بند 4 مورد بحث قرار گرفته است.

3-4- تاثیر طول عضو محوری

با توجه به معادله 2، 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 (13) تاثیر طول عضو بر نمودار نیرو-جابه‌جایی 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 13** تاثیر طول ستون بر نمودار نیرو-جابه‌جایی 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 (14) ارائه شده است. با توجه به شکل (13 و14)، ظرفیت باربری و شکل کمانش یافته هر سه دسته نمونه مشابه هم است. لیکن مطابق توضیح قبل، رفتار پس کمانشی نمونه­ها متاثر 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 تغییرشکل کمانش) را نسبت به حالت L/D = 6 نشان می­دهد:

|  |  |
| --- | --- |
| (7) |  |

در این رابطه *λL* نسبت طول عضو مربوطه به قطر آن می­باشد. استفاده از این پارامتر در بند 4 مورد بحث قرار گرفته است.

**شکل 14**. مقایسه شکل کمانش یافته برای نمونه­های با طول متفاوت

|  |
| --- |
|  |
| **Fig. 14.** Buckled shape of models with varying length |

3-5- تاثیر شعاع جسم برخورد کننده

پارامتر بعدی مورد مطالعه در تحقیق حاضر، شعاع جسم برخورد کننده با عضو فشاری مورد بررسی می­باشد. شکل 15 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 تغییرشکل ایجاد شده پس از برخورد برای هر دو حالت تقریبا مشابه هم بوده و تفاوت بسیار جزئی در انحنا و شیب ناحیه­ی بین بیشترین و کمترین تغییرشکل در دو نمونه ملاحظه می­شود.

شکل 16، نمای تغییرشکل یافته­ی نمونه­های مذکور را پس از بروز کمانش نمایش می­دهد. چنانچه در شکل ملاحظه می­شود شکل کمانش یافته­ی هر دو نمونه تا حد زیادی مشابه هم بوده و تفاوتی بین آنها ملاحظه نمی­گردد؛ بدین صورت که طی روند افزایش تغییرشکل­ها و بروز کمانش، اندک تفاوت موجود در پروفیل تغییرشکل دو نمونه نیز حذف شده و تغییرشکل نهایی نمونه­ها مشابه هم می­گردد.

**شکل 15.**  نمای بالا از تغییرشکل حاصل در اثر برخورد جسم با شعاع متفاوت

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

**شکل 16** مقایسه شکل کمانش 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 17 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 عضو نداشته و ظرفیت نهایی و رفتار پس کمانشی نمونه­های آسیب دیده توسط جسم با شعاع متفاوت تقریبا منطبق بر هم می­باشد. بدین ترتیب می­توان نتیجه­گیری نمود که عمق آسیب، لاغری جداره­ی استوانه، محل آسیب و طول عضو، پارامترهای تاثیرگذار بر رفتار کمانشی استوانه­های آسیب دیده تحت بار محوری می­باشند و شعاع جسم برخورد کننده تاثیر چندانی بر ظرفیت این نمونه­ها ندارد.

شکل 17. نمودارهای نیرو-جابه‌جایی برای نمونه‌های با شعاع متفاوت جسم کروی

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

4- بحث و بررسی

بر اساس مطالب بیان شده در بخش­های قبل، ظرفیت کمانشی عضو آسیب دیده عمدتا متاثر از عمق آسیب وارد شده، لاغری جداره استوانه و محل آسیب است. برای لحاظ نمودن تاثیر سه پارامتر یاد شده، ضرایب αd، αs و αl به داده­های موجود برازش شده و معرفی شد. بدین ترتیب، با استفاده از سه ضریب یاد شده می­توان ظرفیت کمانشی نمونه آسیب دیده را نسبت به نمونه سالم به صورت زیر محاسبه نمود:

|  |  |
| --- | --- |
| (8) |  |

که در آن ظرفیت کمانشی نمونه آسیب‌ دیده و ظرفیت کمانشی نمونه سالم است. همچنین در بخش­های قبل ملاحظه شد که ظرفیت پسماند عضو آسیب دیده در محدوده پس کمانشی (ظرفیت در دو برابر تغییرشکل کمانش) عمدتا متاثر از لاغری جداره استوانه، محل آسیب و طول عضو است. برای لحاظ کردن تاثیر پارامتر­های یاد شده، ضرایب βs، βl و βL 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:

|  |  |
| --- | --- |
| (9) |  |

که در آن ظرفیت پسماند عضو آسیب دیده در دو برابر تغییرشکل کمانش است. برای بررسی دقت رابطه 8 و 9، نتایج حاصل از پیش‌بینی آن‌ها با داده‌های عددی حاصل از تحلیل 360 نمونه با پارامترهای مختلف (که در بخش­های قبل شرح داده شد) مقایسه شده است. شکل (18) نتایج حاصل از این مقایسه را نمایش می­دهد. میانگین، انحراف از معیار و بیشینه قدر مطلق خطای ناشی از استفاده از رابطه 8 به ترتیب برابر با 7/0، 5/0 و 2 درصد است. این در حالیست که به دلیل وابسته بودن ظرفیت پسماند به تغییرشکل­های پس کمانشی، خطای ناشی از برآورد آن بیشتر و مقادیر متناظر برای رابطه 9، به ترتیب برابر با 8/2، 4/2 و 9 درصد است.

**شکل 18.** مقایسه پیش­بینی های معادله 8 و 9 با نتایج تحلیل عددی

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

5. جمع­بندی و نتیجه­گیری

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 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 عمدتا مشابه بوده و تفاوت چندانی ندارند. برای نمونه‌های با نسبت 50D/t= وارد آمدن آسیب با عمق 20% قطر استوانه، ظرفیت کمانشی نمونه را تا 16% 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 50 به 125، باعث 30% کاهش بیشتر در بار کمانشی نمونه می‌شود.
* برای نمونه‌های با لاغری کم (50D/t=)، 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 20% بیشتر کاهش دهد.
* ظرفیت باربری و شکل کمانش یافته نمونه‌های با نسبت متفاوت طول به قطر، L/D، عمدتا مشابه هم هستند. لیکن رفتار پس کمانشی نمونه­ها متاثر از طول عضو مورد بررسی است. نمونه­های با نسبت L/D کم به دلیل سختی خمشی بیشتر، دارای شیب نزولی کمتری در محدوده پس کمانشی نسبت به نمونه‌های با نسبت L/D بیشتر است.
* شعاع جسم برخورد کننده تاثیر چندانی بر ظرفیت کمانشی یا پس کمانشی 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 برازش 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.

1. تقدیر و تشکر

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

1. 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 Researc*h, 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 behaviorof 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 failure of dented steel submarine pipes under combined internal pressure and asymmetric inelastic cycling. *Ocean Engineering*, available online (in press).

[12] Ghaemdoust 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.

[14] Draidi 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.

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

Vahid Akrami1\*, 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

1. . Hutchinson et al. [↑](#footnote-ref-1)
2. . Zhao et al. [↑](#footnote-ref-2)
3. . Draidi et al. [↑](#footnote-ref-3)
4. . Abaqus [↑](#footnote-ref-4)
5. . Hard contact [↑](#footnote-ref-5)