






University Of Qom



A Parametric Study on the Bending Capacity of Dented Hollow Circular Section

Vahid Akrami^{1✉}, Nazanin Mazloumi², Hamed Rahman Shokrgozar³

1. Corresponding author, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: v.akrami@uma.ac.ir
2. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: n.mazloumi@student.uma.ac.ir
3. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: h_rshokrgozar@uma.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 03 Oct 2024
Revised 10 Nov 2024
Accepted 15 Nov 2024
Published 16 Nov 2024

Keywords:

Circular Hollow Sections (CHS), Bending Capacity, Damage Severity, Wall Slenderness Ratio, Finite Element Analysis.

ABSTRACT

Thin-walled steel Circular Hollow Sections (CHS) are widely used in various structures and are subjected to different loads and various types of damages. Previous research has primarily focused on the axial capacity of these sections. This paper provides a numerical study on the bending capacity of damaged CHS sections and the effects of various factors, including damage severity, bending moment angle, and wall slenderness ratio. Modeling for this study was conducted using Abaqus software, and results were validated against previous experimental data. The findings indicate that damage severity and the wall slenderness ratio are the two main parameters affecting the ultimate capacity of the damaged CHS. As these parameters increase, the ultimate capacity of the section significantly decreases. For a damage depth equal to 20% of the section diameter, the reduction in bending capacity varies from 20% for a slenderness ratio of 33.3 to over 36% for a slenderness ratio of 125. This reduction maximizes when damage is located on the compressive face of the cylinder. It was also observed that the length of the member and the location of the damage along it have a negligible effect on the bending capacity. Finally, a relation is provided to estimate the reduction of bending strength due to damage, and is compared with numerical results. This relation is applicable for CHS section with wall-slenderness ratios between 33.3 and 125, length-to-diameter ratios of 4 to 6, damage depth ratios of 0 to 0.2, and bending moment angles of 0 to 90 degrees.

Cite this article: Akrami V, Mazloumi N, Rahman Shokrgozar H. A Parametric Study on the Bending Capacity of Dented Hollow Circular Section. Civil Infrastructure Researches. 2024; 10(2): 147-161. <https://doi.org/10.22091/cer.2024.11423.1578>



بررسی پارامتریک ظرفیت خمشی مقطع توخالی مدور آسیب‌دیده

وحید اکرمی^۱، نازنین مظلومی^۲، حامد رحمن شکرگزار^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: v.akrami@uma.ac.ir

۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: n.mazloumi@student.uma.ac.ir

۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: h_rshokrgozar@uma.ac.ir

چکیده

مقاطع توخالی مدور (CHS) جدار نازک فولادی به دلیل کاربرد گسترده در سازه‌های مختلف، در معرض بارهای مختلف و آسیب‌های گوناگون قرار دارند. تحقیقات پیشین عمدتاً بر بررسی ظرفیت محوری این مقاطع متمرکز می‌باشد. این مقاله به بررسی ظرفیت خمشی مقطع CHS آسیب‌دیده و تأثیر عوامل مختلفی از جمله شدت آسیب، زاویه بارگذاری خمشی و لاغری جداره به روش عددی می‌پردازد. مدل‌سازی‌های تحقیق با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و صحت‌سنجی نتایج با داده‌های تجربی قبلی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که شدت آسیب و نسبت لاغری جداره دو پارامتر اصلی تأثیرگذار بر ظرفیت نهایی پوسته استوانه‌ای آسیب‌دیده می‌باشند. با افزایش این دو پارامتر، ظرفیت نهایی مقطع به طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. برای عمق آسیب برابر با ۲۰٪ قطر مقطع، مقدار کاهش ظرفیت خمشی از ۲۰٪ برای مقطع با لاغری جداره ۳۳/۳ تا بیش از ۳۶٪ برای مقطع با لاغری جداره ۱۲۵ متغیر می‌باشد. آسیب وارده زمانی بیشترین تأثیر کاهنده خود را دارد که در وجه فشاری استوانه قرار گیرد. همچنین ملاحظه شد که طول عضو و محل آسیب در طول آن تأثیر ناچیزی بر ظرفیت خمشی نمونه دارد. نهایتاً رابطه‌ای برای برآورد کاهش مقاومت خمشی ناشی از بروز آسیب در این اعضا ارائه و با نتایج تحلیل‌های عددی مقایسه شده است. این رابطه برای مقطع CHS با لاغری جداره بین ۳۳/۳ تا ۱۲۵، نسبت طول به قطر ۴ تا ۶، نسبت عمق آسیب صفر تا ۰/۲ و زاویه بارگذاری خمشی صفر تا ۹۰ درجه قابل استفاده می‌باشد.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۸/۲۶

کلیدواژه‌ها:

مقاطع توخالی مدور (CHS)،

ظرفیت خمشی،

شدت آسیب،

نسبت لاغری جداره،

تحلیل المان محدود.

استناد: اکرمی وحید، مظلومی نازنین، رحمن شکرگزار حامد. بررسی پارامتریک ظرفیت خمشی مقطع توخالی مدور آسیب‌دیده. پژوهش‌های

زیرساخت‌های عمرانی، ۱۴۰۳، ۱۰(۲): ۱۴۷-۱۶۱. <https://doi.org/10.22091/cer.2024.11423.1578>

۱- مقدمه

مقاطع توخالی مدور (CHS^۱) فولادی با دیواره نازک، به‌طور گسترده در سازه‌های مختلف از جمله پایه پل‌ها، ساختمان‌ها، سکوها، سازه‌های فراساحل، توربین‌های بادی، سازه‌های فضاکار و سایر سازه‌های مهندسی و صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱-۱۲]. این مقاطع به دلیل طراحی خاص خود، همواره در معرض بارهای مکانیکی مختلف از جمله بارهای ایجادکننده خمش قرار دارند. بروز آسیب در اثر برخورد وسایل نقلیه و یا سایر بارهای ناگهانی می‌تواند ظرفیت خمشی این مقاطع را تا حد زیادی کاهش دهد [۵، ۱۳ و ۱۴]. در همین راستا، مقاله حاضر به بررسی ظرفیت خمشی مقطع CHS آسیب‌دیده و تأثیر عوامل مختلفی همچون شدت آسیب، زاویه بارگذاری و لاغری جداره مقطع بر آن می‌پردازد.

تحقیقات عددی و آزمایشگاهی انجام شده بر روی رفتار مقاطع CHS فولادی عمدتاً بر روی تعیین ظرفیت محوری این اعضا متمرکز بوده است. از جمله این تحقیقات می‌توان به منابع [۱۴-۱۹] اشاره نمود. این در حالی است که تحقیقات متعددی نیز توسط محققین بر روی ظرفیت خمشی لوله‌ها و مقاطع توخالی مدور انجام شده است. به عنوان نمونه، در مطالعه‌ای که توسط گوو^۲ و همکاران انجام شده است، ۱۶ نمونه مقاطع توخالی مدور فولادی آسیب‌دیده با اندازه‌های مختلف و ضریب لاغری ۷۵ تا ۳۰۰ تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای قرار گرفته است. براساس نتایج، در مقاطع فشرده با لاغری کمتر و شرایط تکیه‌گاهی ساده، پدیده بیضی‌شدگی مشاهده شده و نمونه‌ها با پلاستیک‌شدگی گسترده در قسمت مرکزی دچار شکست می‌شوند. همچنین، با افزایش نسبت قطر به ضخامت، تعداد موج‌های کمانش، افزایش یافته و کمانش موضعی بیشتر نمایان می‌شود. این در حالی است که

افزودن سخت‌کننده‌ها می‌تواند ظرفیت خمشی و شکل‌پذیری نمونه‌ها را بهبود بخشد [۷].

در تحقیق دیگری، استازویوچ^۳، به بررسی ناپایداری سازه‌های جدار نازک دارای سوراخ پرداخته و نشان داد که وجود برش در این سازه‌ها می‌تواند بار بحرانی را کاهش دهد. این تحقیق از دو روش عددی و آزمایشگاهی برای تعیین بار بحرانی تحت خمشی خالص استفاده کرده است. براساس نتایج، تنش‌های به‌دست آمده آزمایشگاهی کمتر از مقادیر حاصل از تحلیل بوده‌اند که این تفاوت به نواقص هندسی و تمرکز تنش در محل گیره‌ها مربوط دانسته شده است. همچنین، مطابق گزارشات، تأثیر ناکاملی‌های هندسی بر کمانش نمونه‌های دارای سوراخ ریز بیشتر بوده است [۲۰]. نمونه دیگری از این تحقیقات، بررسی لی^۴ و همکاران در خصوص تحلیل مقاومت خمشی مقاطع CHS فولادی و کربنی با حلقه جوش می‌باشد. این مطالعه عددی، اثرات تنش‌های پسماند و عیوب هندسی ناشی از جوش را در مقاطع با ضریب لاغری متغیر بررسی کرده است. نتایج نشان داده است که کمانش موضعی در نزدیکی جوش رخ داده و وجود خط جوش، ظرفیت خمشی مقطع را کاهش می‌دهد. همچنین، با افزایش ضریب لاغری، نسبت مقاومت خمشی به مقاومت پلاستیک کاهش می‌یابد. اثر تنش پسماند و عیوب هندسی ناشی از جوش بر مقاومت خمشی نمونه‌های دارای جوش میانی، بیشتر بوده است [۲۱].

سریک^۵ و همکاران در یک مطالعه عددی و آزمایشگاهی به بررسی رفتار اعضای لوله‌ای در برابر اصابت اجسام با سرعت کم پرداخته و تأثیر فرورفتگی‌های موضعی و تغییرشکل‌های کلیدی تیر را تحلیل کرده‌اند. در این مطالعه، اعضای لوله‌ای براساس نسبت نیروهای مکانیزم به ظرفیت نهایی به سه گروه با محدوده رفتاری متفاوت تقسیم‌بندی شده‌اند [۵].

³- Stasiewicz

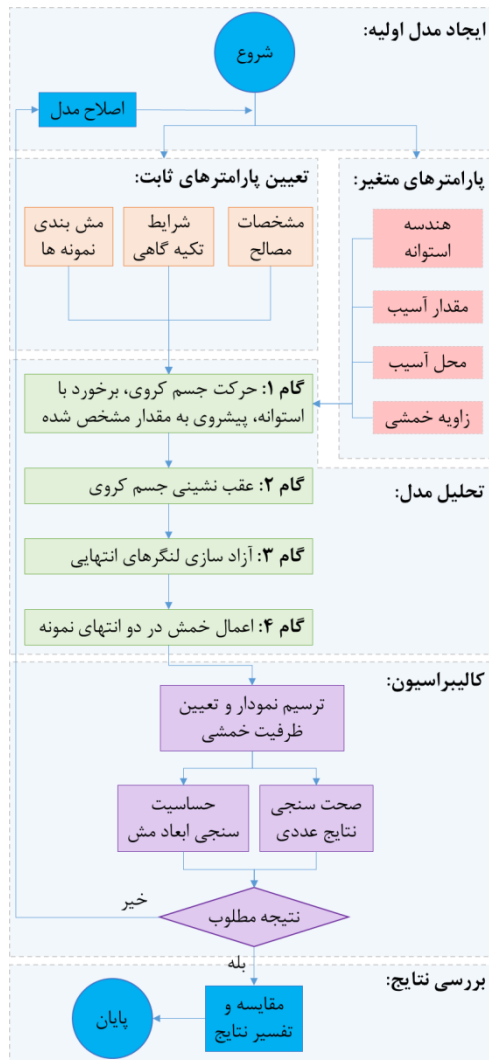
⁴- Lee

⁵- Cerik

¹- Circular Hollow Section

²- Guo

اهمیت است. این تحقیق به شناسایی عوامل مؤثر بر ظرفیت خمشی مقاطع توخالی مدور آسیب‌دیده و برآورد تأثیر هرکدام از این عوامل می‌پردازد. روند کلی و گام‌های طی شده در مراحل مختلف تحقیق مطابق



شکل ۱ می‌باشد.

همچنین جین^۶ و همکاران، رفتار مکانیکی لوله‌های سالم را تحت بارهای ترکیبی فشاری و خمشی به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کرده‌اند. نتایج این بررسی نشان داده است که خرابی نمونه‌های دارای نسبت قطر به ضخامت بزرگ به صورت کماتش موضعی بوده و این نمونه‌ها دارای دو مد کماتش مختلف به صورت فرورفتگی و یا کسینوسی می‌باشند. همچنین، مطابق ملاحظات، پاسخ نمونه‌ها تحت نیروی محوری و خمش به شدت وابسته به نسبت قطر به ضخامت، میزان لنگر اعمال شده و لاغری ستون می‌باشد [۲۲]. ژانگ^۷ و همکاران، رفتار پلاستیک لوله‌های ساندویچی دایره‌ای را با در نظر گرفتن تأثیر فرورفتگی‌های محلی بررسی کردند. در این مطالعه، معیاری برای تسلیم لوله ساندویچی فشرده پیشنهاد و نتایج تحلیلی با داده‌های عددی و تجربی مقایسه شده است [۲۳]. در مطالعه دیگری، رفتار تیر- ستون‌های بیضی شکل توخالی (OHS^۸) تحت ترکیب خمش و فشار از طریق تحقیقات تجربی و عددی بررسی گردید. در این مطالعه، آزمایش‌های شبه‌استاتیکی بر روی نمونه‌های مختلف انجام شده و مکانیزم شکست، استحکام و شکل‌پذیری این تیر- ستون‌ها به دست آمده است. براساس نتایج، کماتش محلی در پای ستون مکانیزم شکست غالب نمونه‌ها بوده است که برای رفع آن طراحی‌هایی پیشنهاد شده است [۴]. نمونه‌های دیگری از مطالعات بر روی رفتار مقاطع CHS فولادی را می‌توان در مراجع [۲۴-۲۶] ملاحظه نمود.

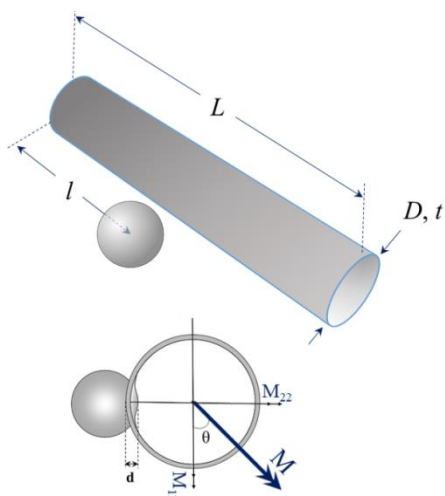
در ادامه تحقیقات انجام شده در این زمینه و با توجه به اهمیت موضوع، مقاله حاضر به بررسی ظرفیت خمشی مقاطع توخالی مدور آسیب‌دیده می‌پردازد. تعیین ظرفیت خمشی این اعضا از دیدگاه طراحی با لحاظ احتمال بروز آسیب و یا ارزیابی و بازطراحی آنها حایز

^۶- Jin

^۷- Zhang

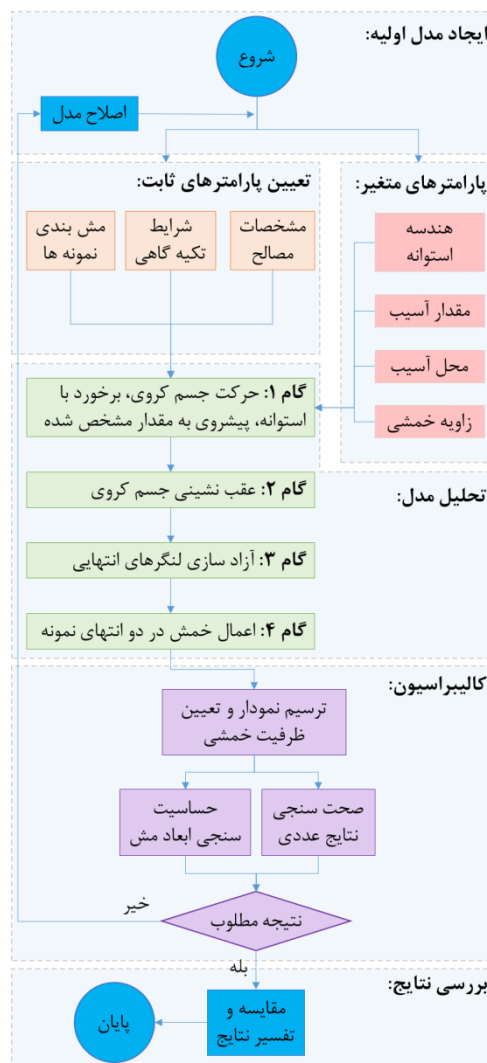
^۸- Oval Hollow Sections

نمونه مورد بررسی در این تحقیق یک مقطع توخالی مدور به طول L ، قطر خارجی D و ضخامت جداره t می‌باشد. در شرایط واقعی، جسم برخوردکننده مانند بخشی از ماشین می‌تواند به صورت قسمتی از یک کره با شعاع مشخص تصور شود. همچنین به منظور اجتناب از تمرکز تنش در محل آسیب، از یک جسم کروی به شعاع r برای ایجاد آسیب استفاده شده است. هندسه پوسته استوانه‌ای مورد مطالعه و جسم کروی که برای ایجاد آسیب استفاده می‌شود، در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- هندسه نمونه‌های مورد بررسی و زاویه اعمال خمش

مطابق شکل، جسم کروی باعث ایجاد آسیبی به شکل فرورفتگی به اندازه d در محلی به فاصله l از لبه عضو مربوطه می‌شود. در صورتی که محل ایجاد آسیب در دورترین تار فشاری واقع شود، زاویه اعمال خمش برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. زاویه اعمال خمش در سایر حالت‌ها نسبت به این حالت با پارامتر θ سنجیده می‌شود. نسبت طول به قطر نمونه مرجع برابر با $L/D=6$ ، لاغری جداره آن (نسبت قطر به ضخامت استوانه) برابر با $D/t=50$ و محل آسیب در وسط طول عضو در نظر گرفته شده است. تأثیر استفاده از مقادیر دیگر برای این نسبت‌ها به صورت پارامتریک بررسی شده است. با توجه به محدوده کاربردی طول و قطر نمونه‌های ممکن، طول نمونه مرجع برابر با ۳۰۰ سانتی‌متر، قطر آن برابر با ۵۰ سانتی‌متر و ضخامت آن برابر با ۱ سانتی‌متر در نظر گرفته



شکل ۱- روند کلی و گام‌های طی شده در مراحل مختلف تحقیق

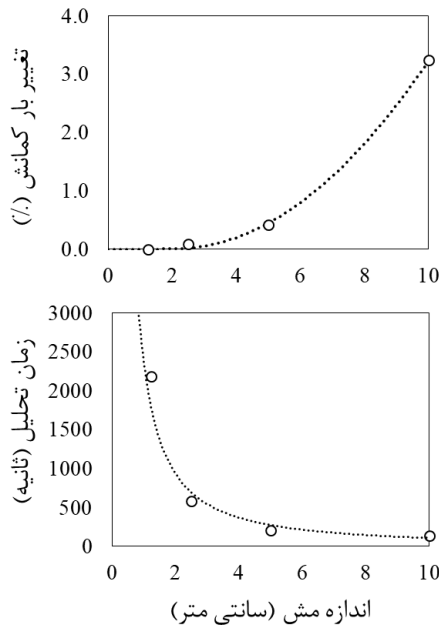
بررسی‌ها به صورت امان محدود و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس^۹ صورت گرفته است. صحت‌سنجی نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های عددی با استفاده از داده‌های تجربی سایر کارها و تحقیقات پیشین انجام شده است. در ادامه، هندسه نمونه‌ها، فرضیات و نحوه مدل‌سازی، صحت‌سنجی نتایج و بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر ظرفیت خمشی نمونه‌ها ارائه شده است.

۲- هندسه و مدل‌سازی نمونه‌ها

۲-۱- هندسه نمونه‌های مورد بررسی

۹- ABAQUS

تقسیم گردیده است. برای تعیین ابعاد مش، تحلیل حساسیت مش برای نمونه‌ای با عمق آسیب $d/D=0/1$ صورت گرفته است که نتایج حاصل در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴- نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مش

مطابق شکل ۴، ملاحظه می‌شود که با کاهش اندازه مش، دقت تحلیل افزایش یافته، ولی زمان مورد نیاز برای تحلیل نیز به صورت شتاب‌دار افزایش می‌یابد. بر همین اساس، ابعاد مش‌بندی در راستای شعاعی و طولی برابر با ۲۵ میلی‌متر (۶۳ تقسیم در راستای شعاعی و ۱۲۰ تقسیم در راستای طولی برای نمونه مرجع) در نظر گرفته شده است. نمونه‌ای از مش‌بندی انجام شده برای مدل‌های عددی در شکل ۵- الف نشان داده شده است.

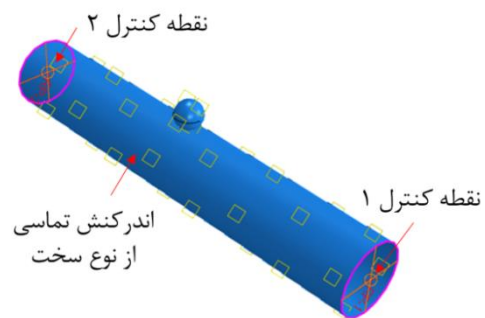
برای به‌دست آوردن ظرفیت مقطع آسیب‌دیده تحت خمش، تحلیل در چهار گام شبه‌استاتیکی مطابق مراحل زیر انجام شده است (شکل ۵):

- ۱- گام نخست، جسم کروی با استوانه برخورد نموده و پس از برخورد استاتیکی، به اندازه عمق آسیب تعیین شده در دیواره نمونه پیشروی می‌کند. در این مرحله، شرایط مرزی در هر دو نقطه کنترل به صورت گیردار می‌باشد.

شده است. طبق تحقیقات انجام شده توسط اکرمی و همکاران، شعاع جسم برخوردکننده تأثیر چندانی بر بار کمانش استوانه نداشته و مقدار عمق فرورفتگی پارامتری تعیین‌کننده‌تری می‌باشد [۱]. بر همین اساس، شعاع جسم برخوردکننده به صورت ثابت برابر یک‌پنجم قطر استوانه در نظر گرفته شده است.

۲-۲- مدل‌سازی المان محدود

در این تحقیق از نرم‌افزار آباکوس به دلیل توانایی بالا در شبیه‌سازی مدل‌های المان محدود استفاده شده است. برای تعریف رفتار الاستیک مصالح فولادی، مقادیر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون به ترتیب برابر با ۲۰۶ گیگاپاسگال و ۰/۳ لحاظ گردیده است. تنش تسلیم مصالح فولادی برابر با ۳۴۵ مگاپاسگال و شیب نمودار تنش- کرنش مصالح در ناحیه سخت‌شوندگی برابر با ۰/۱ لحاظ شده است. برای اعمال شرایط مرزی و لنگر خمشی بر روی نمونه‌ها، ابتدا درجات آزادی گره‌های موجود بر روی لبه سمت راست و چپ عضو به یک نقطه کنترل مقید شده و سپس لنگر مربوطه بر روی این نقاط کنترل اعمال شده است (شکل ۳).



شکل ۳- اعمال قیدها و شبیه‌سازی تماس

جسم برخوردکننده به صورت صلب مدل‌سازی شده و اندرکنش بین سطح برخوردکننده و استوانه از نوع تماس سخت تعریف شده است. برای مش‌بندی و گسسته‌سازی نمونه‌ها از المان پوسته‌ای خطی چهار گرهی با انتگرال‌گیری کاهش یافته (S4R) استفاده شده است. هر المان در راستای ضخامت خود به پنج لایه

جداره ۸/۲۵ میلیمتر مورد آزمایش قرار گرفته است. محل ایجاد آسیب در میانه طول عضو و عمق آسیب برابر با ۱۰/۳ میلیمتر بوده است. نوع فولاد مصرفی Q345B با تنش تسلیم اسمی برابر با ۳۴۵ مگاپاسکال گزارش شده است. نمونه با مشخصات هندسی و مکانیکی شرح داده شده توسط نرم‌افزار المان محدود آباکوس شبیه‌سازی و تحت لنگر خمشی مورد تحلیل قرار گرفته است [۱۷]. برای انجام مقایسه، تغییرشکل نمونه عددی و آزمایشگاهی و منحنی لنگر-انحنای آن مطابق شکل ۶ استخراج شده است. همچنین، مقایسه پارامترهای رفتاری مدل عددی و آزمایشگاهی در جدول ۱ ارائه شده است. مقدار انحنای مورد استفاده در نرم‌ال‌سازی محور افقی نمودار شکل ۶ برابر با ۰/۰۰۲۸۸ و مقدار لنگر مورد استفاده در نرم‌ال‌سازی محور قائم برابر با ۸/۲۷ تن.متر بوده است [۱۷]. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، پروفیل تغییرشکل و منحنی‌های رفتاری برای نمونه عددی و آزمایشگاهی بسیار نزدیک به یکدیگر هستند.

۳- نتایج تحقیق

۳-۱- بررسی تأثیر عمق آسیب

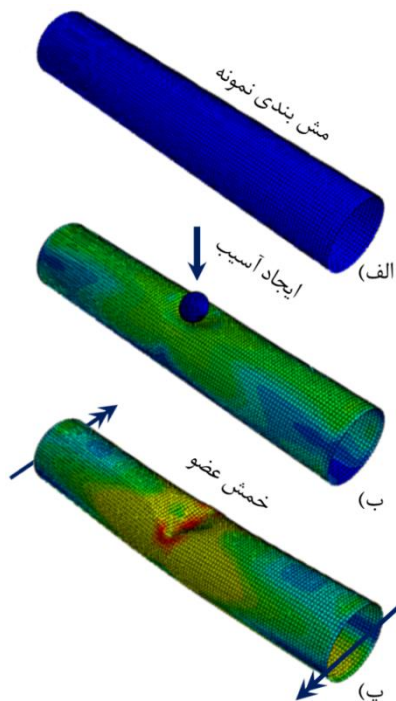
در این بخش، تأثیر میزان آسیب وارده که با میزان فرورفتگی جسم کروی در بدنه عضو یا نسبت، d/D ، سنجیده می‌شود مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۷-الف، حالت تغییرشکل یافته نمونه مرجع با سه مقدار آسیب متفاوت و با زاویه اعمال لنگر صفر را در انتهای تحلیل نشان می‌دهد. نمودار لنگر- دوران این نمونه‌ها در **Error! Reference source not found.** ترسیم

شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش عمق آسیب، میزان تغییرشکل‌های موضعی عضو بیشتر شده و مقاومت خمشی آن کاهش می‌یابد. علاوه بر کاهش لنگر مقاوم مقطع، با افزایش عمق آسیب، دوران متناظر لنگر نهایی نیز به شدت کاهش می‌یابد.

۲- گام دوم، جسم کروی بعد از ایجاد آسیب در استوانه عقب نشینی می‌کند و پس از جدا شدن از استوانه، از فضای مدل عددی حذف می‌گردد.

۳- گام سوم، درجه آزادی حول محورهای اعمال لنگر، باز می‌شود تا خمش منتقل شده به استوانه حاصل از برخورد جسم کروی که در انتهای ستون به صورت لنگر پسماند باقی مانده است، آزاد شود.

۴- گام چهارم، با اعمال دوران در دو قسمت ابتدا و انتهای استوانه، نمونه تحت خمش تک انحنایی قرار می‌گیرد.



شکل ۵- تحلیل نمونه های عددی، (الف) نمونه مش‌بندی شده، (ب) ایجاد آسیب در نمونه و (پ) اعمال خمش

۳-۲- صحت‌سنجی نمونه‌های عددی

برای صحت‌سنجی نتایج تحلیل‌های اجزای محدود، از داده‌های آزمایشگاهی گزارش شده در تحقیقات کای^{۱۰} و همکاران استفاده شده است. در این تحقیق یک استوانه فولادی دارای نقص با قطر ۱۶۹/۲۱، طول ۷۲۰ و ضخامت

¹⁰- Cai

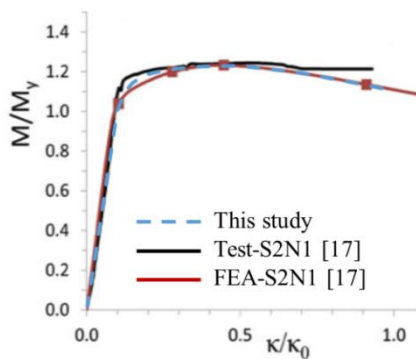
ضخامت آن صورت گرفته است. همچنین زاویه اعمال لنگر خارجی برابر با صفر درجه بوده است. شکل حالت تغییرشکل یافته نمونه‌ها با لاغری جداره مختلف و عمق آسیب، $d/D=0/2$ را نشان می‌دهد. مطابق شکل، با افزایش لاغری جداره، تغییرشکل‌های موضعی عضو در اطراف آسیب افزایش پیدا کرده و با افزایش خمش قسمت آسیب دیده عضو به سمت داخل مچاله می‌شود.

درصد کاهش ظرفیت خمشی به‌دست آمده از تحلیل نمونه‌های مختلف نسبت به نمونه سالم در شکل خلاصه شده است. چنانچه در این شکل مشخص است، با افزایش لاغری جداره مقطع، میزان کاهش ظرفیت نهایی مقطع در اثر آسیب، تشدید می‌شود. همچنین با مقایسه فاصله بین منحنی‌ها ملاحظه می‌شود که اثر ضریب لاغری، D/t ، در لوله‌های ضخیم، چشم‌گیرتر از اثر این پارامتر برای لوله‌های با دیواره نازک‌تر است.

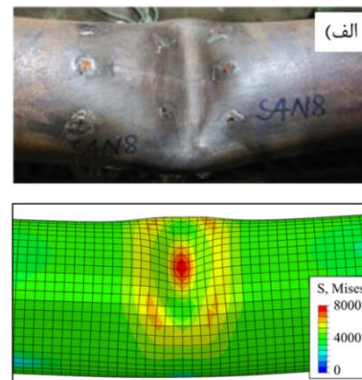
بیشینه لنگر تحمل شده و درصد کاهش ظرفیت پلاستیک نمونه مرجع ($D/t=50$) تحت آسیب‌های متفاوت برای زاویه اعمال لنگر برابر با صفر درجه در جدول ۲ ارائه شده است. مطابق جدول، با افزایش عمق آسیب، مقدار کاهش ظرفیت خمشی عضو آسیب دیده متناسب افزایش می‌یابد تا جایی که برای نمونه با عمق آسیب $d/D=0/2$ ظرفیت خمشی عضو آسیب دیده نسبت به حالت سالم ۲۸٪ کمتر می‌باشد.

۳-۲- بررسی تأثیر لاغری جداره

میزان لاغری جداره استوانه، D/t ، بر ظرفیت خمشی مقطع تأثیرگذار می‌باشد. برای بررسی تأثیر این پارامتر، نمونه‌هایی با لاغری جداره بین $33/3$ تا 125 و نسبت عمق آسیب، d/D ، در محدوده صفر تا $0/2$ مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعات، قطر استوانه ثابت بوده و تغییر میزان لاغری جداره از طریق تغییر



(ب)

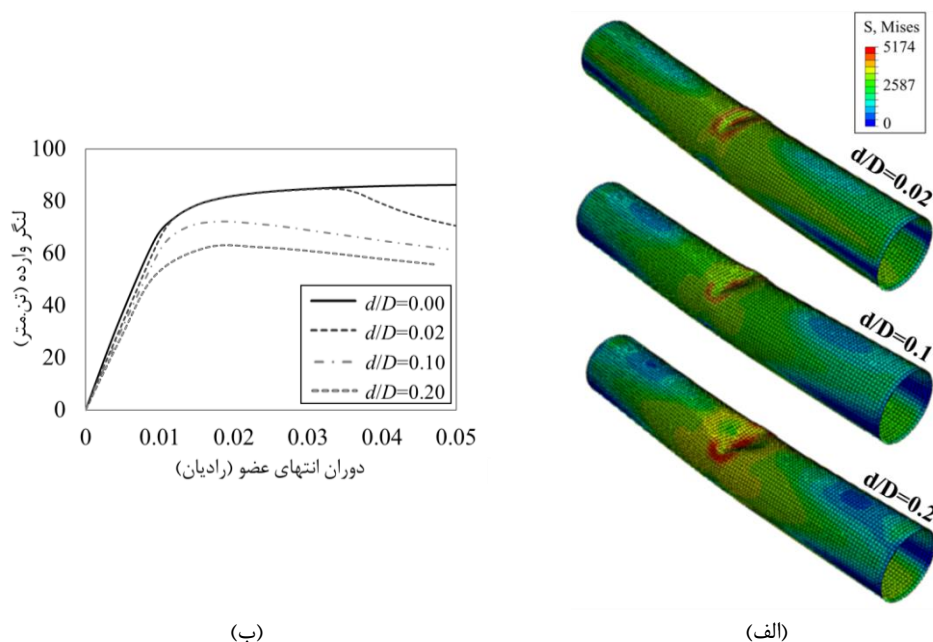


(الف)

شکل ۶- نتایج صحت‌سنجی نمونه‌های عددی و آزمایشگاهی؛ (الف) مقایسه تغییرشکل نمونه و (ب) مقایسه منحنی لنگر انحنا

جدول ۱- مقایسه پارامترهای مدل عددی و آزمایشگاهی

پارامتر	نمونه آزمایشگاهی	نمونه عددی مرجع [۱۷]		نمونه عددی مقاله حاضر	
		مقدار	خطا	مقدار	خطا
سختی	۱۰/۱۸	۱۱/۶۴	۱۴/۳	۹/۶۳	۵/۴
ظرفیت تسلیم	۱/۰۶	۰/۹۸	۷/۵	۱/۰۱	۴/۷
ظرفیت نهایی	۱/۲۶	۱/۲۵	۰/۸	۱/۲۳	۲/۴



شکل ۷- مقایسه (الف) تغییر شکل نمونه مرجع و (ب) منحنی‌های لنگر- دوران نمونه‌ها با عمق آسیب متفاوت

۳-۳- بررسی تأثیر زاویه اعمال لنگر

۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰ و ۱۸۰ درجه. شکل، تغییر شکل و کمانش موضعی عضو تحت لنگر با زوایای مختلف و با عمق آسیب، $d/D=0/2$ را نشان می‌دهد. همچنین، درصد کاهش ظرفیت خمشی نمونه‌های تحت زوایای مختلف در شکل ارائه شده است.

در این قسمت، به بررسی تأثیر زوایای مختلف اعمال لنگر خارجی پرداخته می‌شود. همان طور که گفته شد، این زوایا نسبت به محور عمود بر راستای آسیب سنجیده شده است. زوایای مورد بررسی عبارتند از: صفر،

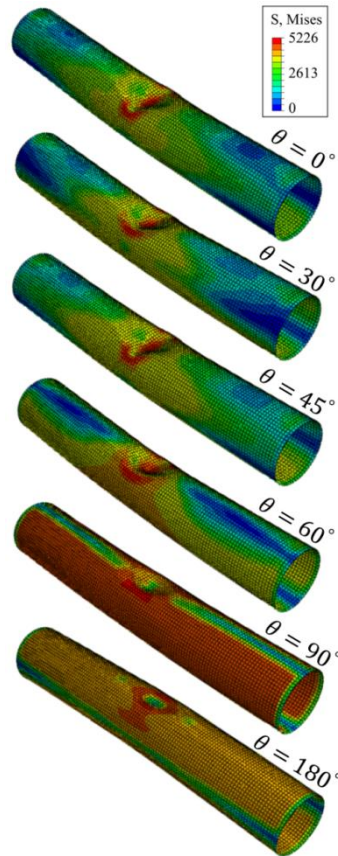
جدول ۲- درصد کاهش ظرفیت پلاستیک نمونه مرجع تحت آسیب‌های متفاوت ($\theta=0^\circ$)

مقدار آسیب (d/D)	ظرفیت خمشی (ton.m)	درصد کاهش (%)
۰/۰۰	۸۶/۵	صفر
۰/۰۲	۸۴/۱	۲/۷
۰/۰۴	۷۹/۲	۸/۴
۰/۰۶	۷۶/۴	۱۱/۷
۰/۰۸	۷۴/۳	۱۴/۲
۰/۱۰	۷۲/۳	۱۶/۴
۰/۱۲	۷۰/۴	۱۸/۶
۰/۱۴	۶۸/۶	۲۰/۷
۰/۱۶	۶۶/۷	۲۲/۹
۰/۱۸	۶۵/۰	۲۴/۹
۰/۲۰	۶۲/۵	۲۷/۸

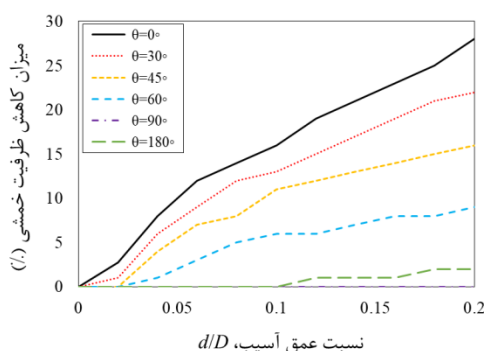
ظرفیت پلاستیک مقطع بیش از یک‌چهارم کاهش یافته که در مساله طراحی و بهره برداری از عضو حائز اهمیت است.

مطابق شکل ۱۱، از میان زوایای ذکر شده، زاویه صفر درجه، بیشترین تأثیر را بر کاهش ظرفیت خمشی مقطع دارد. به طوری که در عمق آسیب، $d/D=0/2$

با ۹۰ درجه به دلیل اینکه قسمت سالم نمونه تحت فشار و کشش قرار دارد، ظرفیت پلاستیک مقطع ثابت باقی مانده و کاهش نیافته است. در زاویه ۱۸۰ درجه، قسمت آسیب دیده عضو بر اثر لنگر وارده تحت کشش قرار گرفته و در نتیجه مقدار کاهش مقاومت ناچیز بوده است.

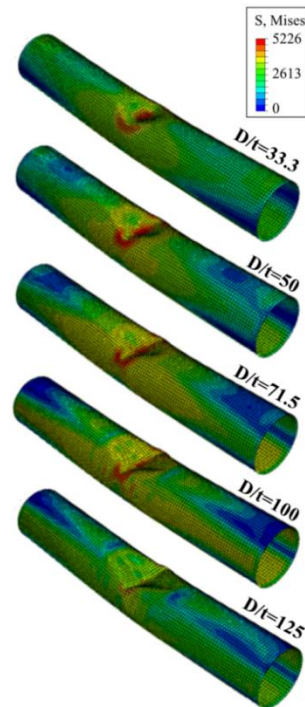


شکل ۱۰- مقایسه تغییر شکل نمونه‌ها با زاویه اعمال لنگر متفاوت در عمق آسیب $d/D=0/2$

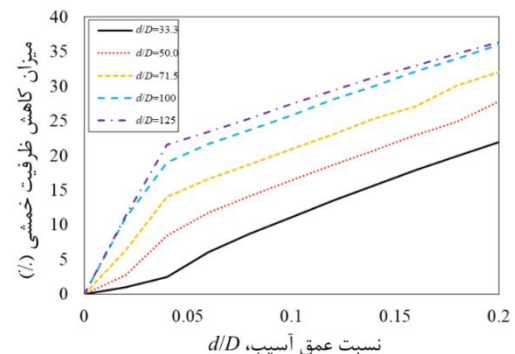


شکل ۱۱- درصد کاهش ظرفیت پلاستیک نمونه‌ها با زاویه اعمال لنگر متفاوت

۳-۴- بررسی تأثیر طول عضو

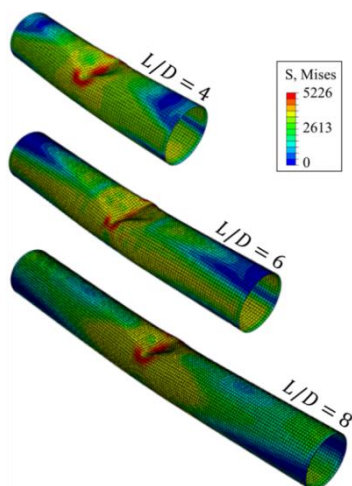


شکل ۸- مقایسه تغییر شکل نمونه‌ها با لاغری جداره متفاوت در عمق آسیب $d/D=0/2$



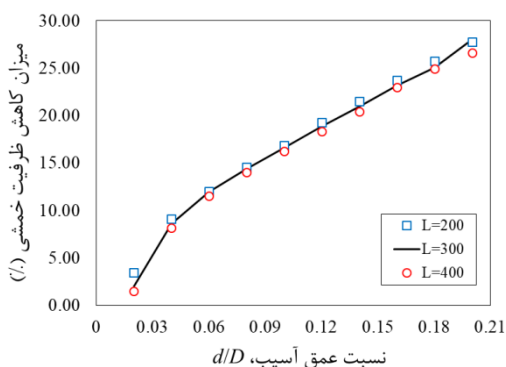
شکل ۹- درصد کاهش ظرفیت پلاستیک نمونه‌ها با نسبت لاغری جداره متفاوت

تحت بارگذاری خمشی با این زاویه، قسمت آسیب دیده استوانه دارای تنش‌های فشاری می‌باشد که در نتیجه با تشدید تغییر شکل‌های ناشی از آسیب، دوران متناظر لنگر نهایی کاهش پیدا کرده و مقطع زودتر دچار کمانش و خرابی می‌شود. در زاویای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه، قسمتی از ناحیه آسیب دیده به فشار و قسمتی دیگر تحت تنش‌های نزدیک صفر بوده و یا به کشش می‌افتد. این باعث می‌شود اثرات کاهنده ناشی از وجود آسیب در جداره مقطع کم‌رنگ‌تر شود. برای زاویه اعمال لنگر برابر



شکل ۸- مقایسه تغییرشکل نمونه‌ها با طول متفاوت در عمق

آسیب $d/D=0.2$



شکل ۱۳- درصد کاهش ظرفیت پلاستیک نمونه مرجع با

سه مقدار طول متفاوت

۳-۵- بررسی تأثیر محل ایجاد آسیب

چنانچه قبلاً نیز شرح داده شد، برای نمونه مرجع محل ایجاد آسیب در نیمه ارتفاع عضو لحاظ شده است ($l=L/2$). با توجه به اینکه در خمش خالص کل طول عضو تحت لنگر یکسانی قرار دارد، انتظار می‌رود تغییر محل آسیب تأثیری در رفتار نمونه ایجاد ننماید. لیکن برای اطمینان از این مسئله، علاوه بر نمونه مرجع یک دسته نمونه دیگر با محل آسیب متفاوت نیز مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجاکه در صورت نزدیک شدن بیش از حد آسیب به کناره‌ها ممکن است اثرات ناشی از حضور تکیه‌گاه بر تغییرشکل‌های موضعی ناشی از برخورد جسم کروی تأثیر گذاشته و رفتار نمونه کلاً متفاوت باشد، بنابراین برای بررسی تأثیر محل آسیب از فرض $l=L/3$

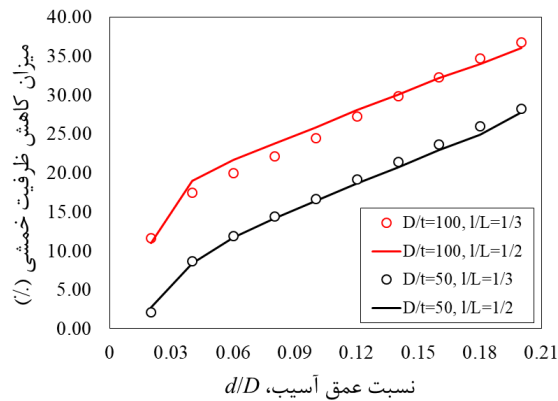
برای نمونه مرجع، نسبت طول به قطر نمونه، L/D برابر با ۶ می‌باشد. با توجه به تحقیقات انجام شده در مرجع [۱]، طول نمونه مورد بررسی تأثیر چندانی بر بار کمانش استوانه آسیب‌دیده تحت بار محوری ندارد. با این حال، برای بررسی تأثیر طول عضو بر رفتار خمشی نمونه‌ها، دو مقدار دیگر برای نسبت L/D یکی برای استوانه کوتاه‌تر ($L/D=4$) و دیگری برای استوانه بلندتر ($L/D=8$)، نیز در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۸ مقایسه تغییرشکل نمونه‌ها با طول متفاوت و عمق آسیب، $d/D=0.2$ را نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است که مشابه نمونه مرجع، ضریب لاغری جداره برای تمامی نمونه‌های مورد بررسی برابر با $D/t=50$ بوده است. چنانچه در شکل ملاحظه می‌شود، برای نمونه‌ها با هر سه طول، کمانش به صورت تغییرشکل‌های موضعی در ناحیه آسیب‌دیده بوده است.

مقایسه ظرفیت خمشی نمونه‌ها با طول و مقدار

آسیب متفاوت در **Error! Reference source**

not found. ترسیم شده است. با توجه به این نمودار،

می‌توان ملاحظه نمود که مشابه رفتار محوری، طول نمونه مورد بررسی تأثیر چندانی بر ظرفیت خمشی نهایی عضو آسیب‌دیده نیز ندارد. از آنجاکه با توجه به لنگرهای انتهایی وارد شده به عضو، مقدار لنگر در کل طول استوانه یکسان است، بنابراین منطقی است که تغییر طول عضو تفاوت چندانی در ظرفیت خمشی آن نداشته باشد. با این حال، تفاوت ناچیزی در مقدار کاهش ظرفیت خمشی نمونه‌ها ملاحظه می‌گردد که ناشی از اثرات موضعی کمانش و تأثیر قیدهای تکیه‌گاهی می‌باشد.



شکل ۱۵- درصد کاهش ظرفیت پلاستیک نمونه‌ها با دو مقدار نسبت لاغری جداره و دو محل آسیب متفاوت

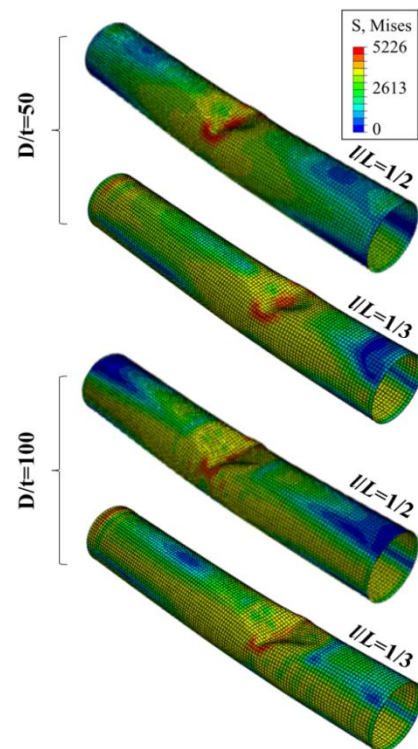
۴- بحث و بررسی نتایج

در این بخش، به بررسی نتایج به دست آمده از تحلیل‌های انجام شده بر روی مقاطع توخالی مدور آسیب‌دیده و ارائه رابطه‌ای برای برآورد مقاومت خمشی این مقاطع خواهیم پرداخت. همان‌طور که در بندهای قبلی اشاره شد، ظرفیت خمشی مقاطع CHS آسیب‌دیده تحت تأثیر سه عامل اصلی قرار دارد: عمق آسیب، ضریب لاغری جداره مقطع و زاویه اعمال لنگر خمشی. در مقابل، طول عضو و محل ایجاد آسیب تأثیر چندانی بر این مشخصه نداشته و می‌توان گفت که این دو عامل در مقایسه با عوامل دیگر، نقش کمتری در کاهش مقاومت خمشی ایفا می‌کنند.

برای برآورد درصد کاهش مقاومت خمشی نمونه‌ها، ابتدا تأثیر همزمان عمق آسیب و ضریب لاغری جداره مقطع را مورد بررسی قرار می‌دهیم. مطابق شکل ۱۶، روند موجود برای کاهش مقاومت خمشی نمونه‌ها، برای عمق آسیب بیشتر و کمتر از $d/D=0.04$ متفاوت با هم می‌باشند. به همین دلیل برای محدوده عمق آسیب بیشتر از $d/D=0.04$ ، مطابق شکل ۱۶۹، از برازش رویه سه‌بعدی به درصد‌های کاهش مقاومت حاصل از لحاظ تأثیر عمق آسیب و ضریب لاغری جداره استفاده شده است. برای محدوده عمق آسیب کمتر از $d/D=0.04$ ، از یک رابطه انتقالی بین مقدار صفر (برای حالت سالم) و درصد کاهش

استفاده شده است. شکل ۱۷، مقایسه تغییر شکل نمونه‌ها با دو محل آسیب متفاوت، $l=L/3$ و $l=L/2$ ، دو مقدار نسبت لاغری جداره، $D/t=50$ و $D/t=100$ و عمق آسیب، $d/D=0.04$ را نمایش می‌دهد.

مطابق شکل ۱۷، علیرغم اینکه توزیع کلی تنش‌ها برای دو محل آسیب، تقریباً مشابه می‌باشد، تفاوت‌های جزئی در تغییر شکل ناحیه آسیب‌دیده مشاهده می‌شود. مقایسه درصد کاهش ظرفیت خمشی نمونه‌ها با محل و مقدار آسیب متفاوت در شکل ۱۸ ترسیم شده است. با توجه به اینکه در نمونه‌های با محل آسیب، $l=L/3$ ، به دلیل عدم تقارن موجود، لنگر دو طرف اندکی متفاوت با هم بوده است، بنابراین لنگر موجود در محل آسیب مبنای مقایسه بوده است. مطابق شکل ۱۸، ملاحظه می‌شود همان‌طور که انتظار می‌رفت، تأثیر تغییر محل آسیب در طول عضو خمشی ناچیز و قابل صرف نظر می‌باشد.



شکل ۱۴- مقایسه تغییر شکل نمونه‌ها با محل آسیب متفاوت در عمق آسیب $d/D=0.04$

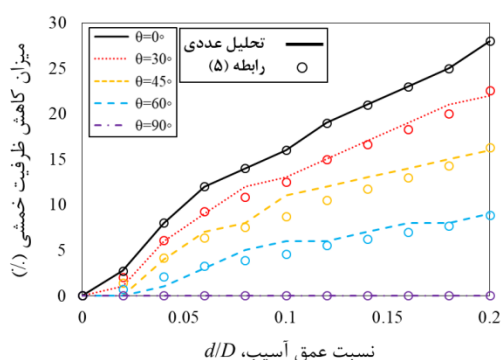
بوده، ولی مقاومت خمشی مربوط به زاویه اعمال لنگر صفر درجه با استفاده از ضریب $(1-0.01\alpha)$ تقلیل داده شده است (ضریب 0.01 برای تبدیل درصد به نسبت می‌باشد). با استفاده از دو جمله اول بسط تیلور برای عبارت رادیکال و چشم‌پوشی از توان دوم عبارات کوچک، مقدار ظرفیت خمشی مقاطع توخالی مدور آسیب‌دیده را می‌توان از رابطه (۳) به شرح ذیل محاسبه نمود:

$$M \approx \left[1 - \frac{\alpha \cdot \cos^2 \theta}{100 - \alpha \cdot \sin^2 \theta} \right] M_p \quad (4)$$

بدین ترتیب، درصد کاهش مقاومت نمونه‌ها با لحاظ اثرات مربوط به زاویه اعمال لنگر، به صورت زیر قابل بیان می‌باشد:

$$\text{درصد کاهش مقاومت} = \frac{\alpha \cdot \cos^2 \theta}{100 - \alpha \cdot \sin^2 \theta} \times 100 \quad (5)$$

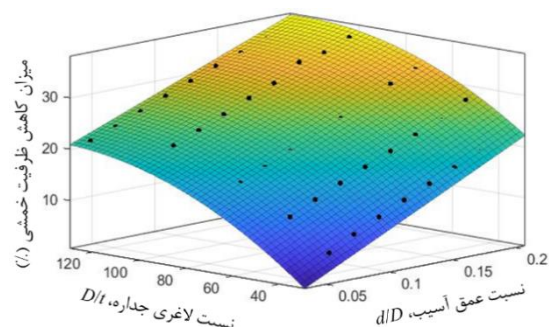
لازم به ذکر است که محدوده زاویه θ برای استفاده در رابطه فوق بین صفر و 90° درجه می‌باشد. نمودارهای شکل مقایسه نتایج به‌دست آمده از تحلیل المان محدود و رابطه (۵) در برآورد درصد کاهش ظرفیت خمشی پلاستیک نمونه‌ها با لحاظ تأثیر زاویه اعمال لنگر را نمایش می‌دهد. مطابق شکل، ملاحظه می‌شود که رابطه به‌دست آمده فوق، روند کاهش ظرفیت خمشی نمونه‌ها را به نحو مناسبی برآورد می‌نماید.



شکل ۱۷- مقایسه نتایج به‌دست آمده از تحلیل المان محدود و رابطه (۵) در برآورد درصد کاهش ظرفیت پلاستیک نمونه‌ها با لحاظ تأثیر زاویه اعمال لنگر

برای بررسی دقیق‌تر، مقدار قدرمطلق خطای حاصل از استفاده رابطه (۵) برای تمامی نمونه‌های تحلیل شده،

مقاومت به‌دست آمده برای عمق آسیب $d/D=0.04$ استفاده شده است.



شکل ۹- برازش رویه سه‌بعدی به درصدهای کاهش مقاومت حاصل از لحاظ تأثیر عمق آسیب و ضریب لاغری جداره

بدین ترتیب برای زاویه اعمال لنگر برابر با صفر درجه، درصد کاهش ظرفیت خمشی را از رابطه تقریبی زیر می‌توان محاسبه نمود:

برای $d/D < 0.04$:

$$\alpha = \left[\begin{array}{c} -259 + 11.8265 \left(\frac{D}{t} \right) \\ -0.043625 \left(\frac{D}{t} \right)^2 \end{array} \right] \left(\frac{d}{D} \right) \quad (1)$$

برای $d/D \geq 0.04$:

$$\alpha = -15.52 + 129 \left(\frac{d}{D} \right) + 0.4834 \left(\frac{D}{t} \right) - 0.2585 \left(\frac{d}{D} \right) \left(\frac{D}{t} \right) - 0.001745 \left(\frac{D}{t} \right)^2 \quad (2)$$

برای لحاظ تأثیر زاویه اعمال لنگر خمشی، از رابطه اندرکنشی بین خمشی اعمال شده در دو جهت متعامد مطابق رابطه (۳) استفاده می‌نماییم:

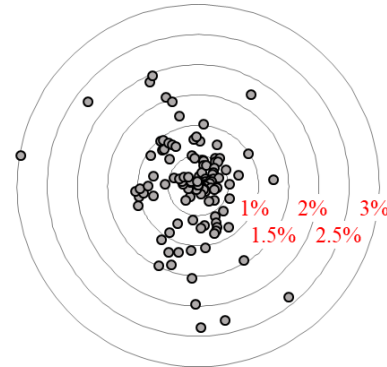
$$\left(\frac{M \cdot \sin \theta}{M_p} \right)^2 + \left(\frac{M \cdot \cos \theta}{(1-0.01\alpha) M_p} \right)^2 = 1 \quad (3)$$

که در آن $M \cdot \cos \theta$ تصویر لنگر وارده بر روی محور با زاویه صفر درجه، $M \cdot \sin \theta$ تصویر لنگر وارده بر روی محور با زاویه 90° درجه و M_p ظرفیت لنگر پلاستیک مقطع می‌باشد. چنانچه در این رابطه ملاحظه می‌شود، مقاومت خمشی مربوط به زاویه اعمال لنگر 90° درجه بدون کاهش

در نرم افزار آباکوس انجام و صحت سنجی نتایج با داده های تجربی قبلی انجام گرفت. نتایج تحلیل ها نشان داد که با افزایش عمق آسیب، ظرفیت خمشی مقطع به شدت کاهش می یابد. مقدار این آسیب وابسته به نسبت لاغری جداره مقطع و زاویه اعمال خمش نسبت به محل قرارگیری آسیب در محیط مقطع می باشد. برای عمق آسیب برابر با ۲۰٪ قطر مقطع، مقدار کاهش ظرفیت خمشی از ۲۰٪ برای مقطع با لاغری جداره ۳۳/۳ تا بیش از ۳۶٪ برای مقطع با لاغری جداره ۱۲۵ متغیر می باشد. اثر کاهش ناشی از آسیب زمانی به اوج خود می رسد که آسیب در ناحیه فشاری استوانه قرار گیرد (با در نظر گرفتن زاویه اعمال لنگر). هرچه آسیب به سمت تار خنثی یا ناحیه کششی نزدیک تر شود، تأثیر آن بر کاهش مقاومت نمونه کمتر خواهد شد.

در ادامه بررسی ها، یک رابطه تحلیلی برای برآورد درصد کاهش مقاومت خمشی مقاطع توخالی مدور آسیب دیده ارائه شده است که تأثیر عمق آسیب، لاغری جداره مقطع و زاویه اعمال لنگر را در نظر می گیرد. این رابطه به طور مؤثری نتایج به دست آمده از تحلیل های انجام شده را تأیید کرده و دقت مناسبی را در پیش بینی ظرفیت خمشی نمونه ها نشان می دهد. نتایج این تحقیق به مهندسان و طراحان کمک می کند تا در ارزیابی و بازطراحی سازه های آسیب دیده، به ویژه در شرایط بارگذاری غیرمترقبه، برآوردهای واقعی تری از ظرفیت خمشی چنین مقاطعی داشته باشند.

محاسبه و در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. مطابق شکل، حداکثر خطای برآورد این رابطه ۳٪ و میانگین قدرمطلق خطای این رابطه ۰/۵۷ درصد می باشد که به نظر می رسد قابل قبول باشد.



شکل ۱۰- میزان قدرمطلق خطای رابطه (۵) در برآورد درصد کاهش مقاومت خمشی نمونه ها

در خاتمه لازم به ذکر است که برای اصلاح رفتار مقطع CHS آسیب دیده و بازیابی ظرفیت از دست رفته، از روش های تقویت مختلف مانند پر کردن لوله آسیب دیده با بتن، تقویت موضعی محل آسیب با ورق، صافکاری موضعی با حرارت دهی، تقویت با FRP و غیره استفاده می شود که بررسی تأثیر آنها به عنوان پیشنهاد برای پژوهش های بعدی توصیه می شود [۲۷-۳۱].

۵- نتیجه گیری

مقاله حاضر به بررسی ظرفیت خمشی مقاطع CHS آسیب دیده و تأثیر عوامل مختلفی از جمله شدت آسیب، زاویه بارگذاری خمشی و لاغری جداره به روش عددی می پردازد. بدین منظور، مدل سازی عددی نمونه ها

References

- [1] Akrami V, Adili A, Shakeri K, Shahbazi N. An Investigation on the Cyclic Behavior of I-Shaped Beam to Circular Column Moment Connections with Channel Link. *Civil Infrastructure Researches*. 2023 Dec 22; 9(2): 141-161. doi: 10.22091/cer.2023.9497.1485 [In Persian]
- [2] Jabbari E, Karami H, Molaiyfarid M. Numerical investigation of the influence of a hole at the pier of the bridge on the flow characteristics of the pier. *Civil Infrastructure Researches*. 2017 Aug 23; 3(1): 17-29. doi: 10.22091/cer.2017.1930.1073 [In Persian]
- [3] Dehghani E, Mousavi SO. Study of the modification factor of concrete bridges with Elastomeric Rubber Bearing (ERB) and Lead Rubber Bearing (LRB). *Civil Infrastructure Researches*. 2016 Aug 22; 2(1): 13-24. doi: 10.22091/cer.2015.750 [In Persian]

- [4] Fang C, Wang F, Wang C, Zheng Y. Cyclic behavior of oval hollow section (OHS) beam-columns. *Thin-Walled Structures*. 2021 Apr 1; 161: 107430. doi: [10.1016/j.tws.2020.107430](https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107430)
- [5] Cerik BC, Shin HK, Cho SR. A comparative study on damage assessment of tubular members subjected to mass impact. *Marine Structures*. 2016; 46: 1-29. doi: [10.1016/j.marstruc.2015.11.002](https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2015.11.002)
- [6] Amirabadi R, Arbabi H, Arezoumand A, Saleh M. Evaluation of the Seismic Vulnerability of Piles and Metal Decks Due to the Aging of the Structure. *Civil Infrastructure Researches*. 2019 Feb 20; 4(2): 71-79. doi: [10.22091/cer.2019.3738.1135](https://doi.org/10.22091/cer.2019.3738.1135) [In Persian]
- [7] Guo L, Yang S, Jiao H. Behavior of thin-walled circular hollow section tubes subjected to bending. *Thin-Walled Structures*. 2013; 73: 281-289. doi: [10.1016/j.tws.2013.08.014](https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.08.014)
- [8] Alsalah A, Holloway D, Ghazijahani TG. Recovery of capacity lost due to openings in cylindrical shells under compression. *Journal of Constructional Steel Research*. 2017 Oct 1; 137: 169-179. doi: [10.1016/j.jcsr.2017.06.006](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.06.006)
- [9] Taghizadeh Valdi MH, Pourhadi Gavabari M. Analysis of Behavior of Spatial Structures in Bridges Deck With Changes in Diameter and Length of Members. *Civil Infrastructure Researches*. 2020 Aug 22; 6(1): 17-28. doi: [10.22091/cer.2020.5328.1197](https://doi.org/10.22091/cer.2020.5328.1197) [In Persian]
- [10] Sharifi M, Moezi A, Sobati N. The Seismic Fragility Curve of Atmospheric Steel Storage Tanks on a Pile. *Civil Infrastructure Researches*. 2019 Aug 23; 5(1): 51-60. doi: [10.22091/cer.2019.3804.1136](https://doi.org/10.22091/cer.2019.3804.1136) [In Persian]
- [11] Sobhan MS, Hosseini P. A Study of the Buckling Behavior of Aboveground Cylindrical Steel Tank under Seismic Loading. *Civil Infrastructure Researches*. 2022 Aug 23; 8(1): 21-34. doi: [10.22091/cer.2021.7560.1324](https://doi.org/10.22091/cer.2021.7560.1324) [In Persian]
- [12] Kouhestani S, Sayyafzadeh B, Sharifi M. Seismic Vulnerability Assessment of Derrick-Supported Flare-Stacks Using Fragility Curves. *Civil Infrastructure Researches*. 2020 Aug 22; 6(1): 89-102. doi: [10.22091/cer.2021.6244.1218](https://doi.org/10.22091/cer.2021.6244.1218) [In Persian]
- [13] Safari Honar F, Mohammadi Dehcheshmeh E, Broujerdian V, Torabi M. Nonlinear Dynamic Behavior of Three-Dimensional Moment Steel Frames and Dual System under Vehicle Impact. *Civil Infrastructure Researches*, 2022; 7(2): 21-31. doi: [10.22091/cer.2021.7270.1287](https://doi.org/10.22091/cer.2021.7270.1287) [In Persian]
- [14] Cui G, Zhai X, Meng L. Behavior of axially loaded high-strength steel circular hollow section tubes under low velocity lateral impact. *Thin-Walled Structures*. 2023 Apr 1; 185: 110595. doi: [10.1016/j.tws.2023.110595](https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110595)
- [15] Prabu B, Raviprakash AV, Venkatraman A. Parametric study on buckling behaviour of dented short carbon steel cylindrical shell subjected to uniform axial compression. *Thin-Walled Structures*. 2010; 48(8): 639-649. doi: [10.1016/j.tws.2010.02.009](https://doi.org/10.1016/j.tws.2010.02.009)
- [16] Ghazijahani TG, Jiao H, Holloway D. Plastic buckling of dented steel circular tubes under axial compression: An experimental study. *Thin-Walled Structures*. 2015; 92: 48-54. doi: [10.1016/j.tws.2015.02.018](https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.02.018)
- [17] Vakili M, Showkati H. Experimental and numerical investigation of elephant foot buckling and retrofitting of cylindrical shells by FRP. *Journal of Composites for Construction*. 2016; 20(4): 04015087. doi: [10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000640](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000640)
- [18] Stanković M, Ristić M, Simonović A, Jovanović M. Buckling Behaviour of Dented Aluminium Alloy Cylindrical Shell Subjected to Uniform Axial Compression. *FME Transactions*. 2017; 45(3): 441-447. doi: [10.5937/fmet1703441S](https://doi.org/10.5937/fmet1703441S)
- [19] Akrami V, Norouzi M, Teymour-Moghaddam S. A parametric study on the axial load carrying capacity of dented cylindrical columns. *Modares Civil Engineering journal*. 2021; 21(4): 19-33. [In Persian]
- [20] Stasiewicz P. Analytical and experimental studies of stability of cylindrical shells with a cut-out. *Mechanics and Mechanical Engineering*. 2013; 17(2): 167-176.
- [21] Lee CH, Chang KH, Park KT, Shin HS, Kim T. Bending resistance of girth-welded stainless steel circular hollow sections. *Thin-Walled Structures*. 2013; 73: 174-184. doi: [10.1016/j.tws.2013.08.002](https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.08.002)
- [22] Jin S, Cheng P, Saneian M, Bai Y. Mechanical behavior of thin tubes under combined axial compression and bending. *Thin-Walled Structures*. 2021; 159: 107255. doi: [10.1016/j.tws.2020.107255](https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107255)
- [23] Zhang J, Du J, Yuan H, Sun H. Plastic behavior of circular sandwich tubes considering the effect of local denting. *Thin-Walled Structures*. 2022 Jun 1; 175: 109268. doi: [10.1016/j.tws.2022.109268](https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109268)
- [24] Cai J, Jiang X, Lodewijks G. Numerical investigation of residual ultimate strength of dented metallic pipes subjected to pure bending. *Ships and Offshore Structures*. 2018 Jul 4; 13(5): 519-531. doi: [10.1080/17445302.2018.1430200](https://doi.org/10.1080/17445302.2018.1430200)
- [25] Houliara S, Karamanos SA. Buckling of Thin-Walled Long Steel Cylinders Subjected to Bending. *Journal of pressure vessel technology*. 2011; 133(1): 011201. doi: [10.1115/1.4002902](https://doi.org/10.1115/1.4002902)
- [26] Wang L, Tian X, Yang H. Load-Bearing Capacity of X80 Dented Pipelines under Typical Loads. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2024 Feb; 24(1): 190-201. doi: [10.1007/s11668-023-01827-0](https://doi.org/10.1007/s11668-023-01827-0)
- [27] Ahmadi M, Musavi MR. Effect of High-Strength Materials on Axial Capacity of CFT Columns. *Civil Infrastructure Researches*. 2021 Feb 19; 6(2): 49-66. doi: [10.22091/cer.2021.6837.1239](https://doi.org/10.22091/cer.2021.6837.1239) [In Persian]

- [28] Pachideh G, Gholhaki M, Moshtagh A. An experimental study on cyclic performance of the geometrically prismatic concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) columns. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 2021; 45: 629-638. **doi: 10.1007/s40996-020-00410-z**
- [29] Pachideh G, Gholhaki M, Moshtagh A. Impact of temperature rise on the seismic performance of concrete-filled double skin steel columns with prismatic geometry. *Journal of Testing and Evaluation*. 2021; 49(4): 2800-2815. **doi: 10.1520/JTE20200037**
- [30] Shokrgozar H.R., Akrami V., Ma'af T.J., Shahbazi N. The effect of different retrofitting techniques on the axial load carrying capacity of damaged cylindrical shells. In *Structures*. 2021 Jun 1; 31: 590-601. **doi: 10.1016/j.istruc.2021.01.048**
- [31] Pachideh G, Gholhaki M. Evaluation of concrete filled steel tube column confined with FRP. *Journal of Testing and Evaluation*. 2020; 48(6): 4343-4354. **doi: 10.1520/JTE20180148**