

مقاوم سازی کمانشی پوسته های استوانه ای جدار نازک فولادی توسط حلقه های CFRP تحت بار گذاری فشار یکنواخت جانبی

سیروس یوسفی خاتونی^{۱*}، حسین شوکتی^۲

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ایران

۲- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ایران

* s.yousefikhathuni@urmia.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۸/۷/۳۰

تاریخ دریافت: ۹۸/۵/۱۲

چکیده

افزایش مقاومت کمانشی و فراکمانشی پوسته های استوانه ای جدار نازک فولادی برای کاربردهای گوناگون این سازه ها دارای اهمیت زیادی است. برای مقاوم سازی پوسته های استوانه ای فولادی روش مرسوم استفاده از رینگ های فولادی است. ولی استفاده از این روش با توجه به شرایط کارگاهی و اینکه ممکن است سازه تحت بار بوده و حامل محتویات باشد برای استفاده از جوشکاری توام با خطرات آتش سوزی بوده و عملاً در این گونه سازه ها امکان استفاده از این روش وجود نخواهد داشت. بنابراین با توجه به موضوع فوق، در این پژوهش با توجه به مزایای ایده استفاده از CFRP به عنوان مصالح جدید و به صورت جایگزین حلقه های تقویت کننده فولادی، برای مقاوم سازی پوسته های استوانه ای جدار نازک تحت فشار جانبی یکنواخت پژوهش شده است. در این پژوهش آزمایشگاهی از نوارهای CFRP به عنوان تقویت کننده در مقابل کمانش پوسته در محل های معین در ارتفاع پوسته استفاده شده است. نتایج آزمایش های نمونه ها نشان می دهد که نوارهای CFRP ظرفیت کمانشی و فراکمانشی پوسته های جدار نازک را به مقدار قابل ملاحظه ای افزایش می دهند. نتایج آزمایشگاهی حاکی از برآورد بالای ظرفیت پوسته ها توسط روابط آئین نامه ای و روابط تنوری است و نیز نتایج نمونه های آزمایشگاهی هماهنگی خوبی با نتایج تحلیل های عددی غیر خطی دارد.

واژگان کلیدی: مقاوم سازی - مخازن استوانه ای جدار نازک - ظرفیت کمانشی - مصالح CFRP - فشار یکنواخت جانبی

۱- مقدمه

سازه های استوانه ای به دلیل شکل هندسی خاص همواره مورد توجه مهندسين و طراحان رشته های عمران و مکانیک قرار گرفته است. این سازه ها به دلیل قابلیت تحمل بارهای زیاد و همچنین به جهت داشتن نسبت وزن کمتر نسبت به وزن مصالحی که در آنها ذخیره می شود دارای اهمیت است. در پوسته های استوانه ای جدار نازک ضخامت جداره پوسته نسبت به دیگر ابعاد آن بسیار کوچکتر است. در این سازه ها نسبت (R/t) می تواند از 500 به بالا در نظر گرفته شود. [1] از این سازه ها در صنایع مختلف مانند مخازن، سیلوها، و دودکش ها و برج های خنک کننده نیروگاه ها استفاده می شود. [2]

این سازه ها با توجه به نوع موادی که در آنها ذخیره می شود در طول زمان های مختلف تحت بارگذاری های متفاوت قرار می گیرند. از انواع بارهایی که به این سازه ها وارد می شود می توان به بار محوری فشاری، فشار یکنواخت جانبی، بارهای لبه ای، بارهای پیچشی و همچنین بارهای ترکیبی، حرارتی، زلزله و باد اشاره نمود.

از مواردی که همواره در طراحی این سازه ها مورد توجه آئین نامه های طراحی است بحث کمانش جانبی است که تحت بارهای مختلف و یا ترکیبی از آنها بوجود می آید و موجب کاهش شدید مقاومت این نوع سازه ها می شود. [3-5]

اولین راه حل این افزایش مقاومت کمانشی پوسته ها افزایش ضخامت پوسته است، ولی این راه حل اقتصادی نیست. راه حل دیگر می تواند استفاده از رینگ های فولادی باشد. [6]

این راه حل هم همراه با مشکلاتی است که از جمله می توان به موارد زیر اشاره کرد: قیمت بالای فولاد، زنگ زدگی و مشکلات مربوط به عملیات جوشکاری همچون خطر آتش سوزی در مخازن حاوی مواد سوختی و بوجود آمدن ناکاملی های هندسی در سطح پوسته در محل جوشکاری که این خود باعث کاهش مقاومت کمانشی این سازه ها می شود.

جنادی لوو و همکاران رفتار کمانش پوسته های فلزی جدار نازک تقویت شده با پوشش FRP را مورد مطالعه قرار داده اند. این پژوهش با در نظر گرفتن تاثیر ضخامت FRP و برای قرارگیری الیاف FRP و بار محوری کمانش انجام شده است. [7]

دی فرناندو و همکاران رفتار لمینت های CFRP چسبیده شده روی پایه فلزی با استفاده از یک چسب ترد را بررسی قرار داده اند. این بررسی به صورت تحلیلی رفتار اتصال CFRP به فولاد را پژوهش کرده است. [8]

در این پژوهش برای مقاوم سازی پوسته های استوانه ای در مقابل کمانش راه حل جدیدی پیشنهاد می شود که اغلب مشکلات گفته شده را برطرف می کند. این راه حل استفاده از حلقه های با مصالح کامپوزیتی CFRP جهت افزایش ظرفیت کمانشی و پس کمانشی پوسته های استوانه ای فلزی در برابر فشار یکنواخت جانبی است.

استفاده از مصالح نوین CFRP جهت ساخت و نیز تقویت سازه ها و اجزا باربر اخیراً رو به افزایش بوده است و در مراکز تحقیقاتی و دانشگاهی نیز مطالعات و تست های مختلفی برای شناخت رفتار این مصالح و نیز در سازه های تقویت شده با این مصالح صورت می گیرد. در سالهای گذشته اکثر مطالعات در زمینه رفتار سازه های تقویت شده با مصالح CFRP محدود به سازه های بتنی می شود ولی به تازگی مطالعات و پژوهش های در زمینه رفتار سازه های فولادی تقویت شده با این مصالح گسترش یافته است و نتایج حاکی از تاثیر مطلوب این مصالح در افزایش مقاومت اجزا و سازه های فولادی است.

در این مقاله با استفاده از روش آزمایشگاهی و نیز روش تحلیل نرم افزاری و روابط تقریبی ریاضی کاربرد رینگ های با مصالح کامپوزیت CFRP به عنوان مصالح نوین، برای مقاوم سازی پوسته های استوانه ای پیشنهاد می شود. مصالح CFRP دارای خواص مثبتی نسبت به دیگر مصالح است که عبارتند از داشتن نسبت مقاومت به چگالی بالا و قابلیت نصب راحت و عدم نیاز به تجهیزات اضافی در مقایسه با دیگر مصالح است. این مصالح همچنین نسبت به مصالح سستی دارای دوام بالایی است. برای هدف های مقاوم سازی با CFRP نیازی به تخلیه محتویات مخزن نیست و بدون خارج از سرویس کردن مخازن می توان از قسمت خارج عمل نصب مصالح را انجام داد. اتصال CFRP به پوسته توسط چسب راحت تر از جوش است. استفاده از این مصالح موجب ایجاد تنش های پس ماند و ناکاملی روی پوسته نمی شود. در مخازنی که حامل مواد قابل اشتعال هستند، استفاده از این مصالح برای افزایش ظرفیت کمانشی و پس کمانشی خطر آتش سوزی را مرتفع می سازد.

تقویتی بتواند در مقابل کمایش مقاومت داشته باشد و موجب تغییر مد کمایشی محوری نمونه شود.

در جدول (۱) مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی بیان شده است. نمونه یک فاقد حلقه تقویتی است. محل نصب حلقه‌های CFRP در نمونه دوم و سوم وسط ارتفاع نمونه و در نمونه چهارم و پنجم، یک سوم و دو سوم ارتفاع نمونه است. عرض حلقه‌های CFRP نیز در هر دو نمونه ۵۰ میلی‌متر است. برای اتصال نوار CFRP به بدنه پوسته استوانه‌ای از چسب مخصوص دو جزئی استفاده می‌شود [12].

از نظر شرایط تکیه گاهی نیز نمونه‌ها در هر دو قسمت پایین و بالا در جهت‌های شعاعی دوجته و محوری یک طرفه مقید هستند. در شکل (۱) نمونه‌های آزمایشگاهی نشان داده شده است.

۲-۲- مشخصات مکانیکی

مشخصات مکانیکی مصالح فولادی پوسته استوانه‌ای از آزمایش کششی نمونه بدست آمده است. این مشخصات شامل مدول الاستیسیته، تنش تسلیم، تنش نهایی و کرنش‌های مربوطه. آزمایش تست کشش مصالح فولادی بر اساس استاندارد-ASTM E8/E8M 15a انجام شده است. برای انجام این آزمایش از سه نمونه استفاده شده است. در شکل (۲) نمونه‌های آزمایش کشش و نیز دستگاه آزمایش و همچنین نمودار تنش-کرنش نشان داده شده است. در جدول (۲) نتایج استخراج شده از آزمایش کشش مصالح مشاهده می‌شود. مشخصات مصالح CFRP در مرجع [12] آورده شده است.

۳- انجام آزمایش و ثبت نتایج

۳-۱- سیستم بارگذاری نمونه‌ها

برای انجام آزمایش و بررسی رفتار کمایشی و فراکمایشی نمونه‌های آزمایشگاهی از دستگاه پمپ مکش هوا استفاده می‌شود. این دستگاه هوای داخل نمونه‌ها را با سرعت حداکثر ۴۰ متر مکعب در ساعت می‌تواند تخلیه نماید. با شروع آزمایش هوای داخل مخزن به بیرون کشیده می‌شود و از آنجا که در این مطالعه بارگذاری از نوع بارگذاری فشار یکنواخت جانبی است پس از سیستمی استفاده شده است تا توسط میله‌هایی که در این سیستم به کار رفته است، از بارگذاری

جی جنگ تنگ و همکاران در زمینه استفاده از FRP برای جلوگیری از کمایش موضعی لوله‌های فلزی مطالعه انجام داده‌اند. آنها مشاهده کردند که استفاده از FRP بطور محسوسی سختی و استحکام لوله‌های فولادی را افزایش می‌دهد. [9]

ام باتیکا و همکاران در دانشگاه ادینبرگ در مورد تاثیر استفاده از FRP بر افزایش مقاومت کمایشی پوسته‌های استوانه‌ای با ناکاملی متقارن پژوهش نموده‌اند. آنها دریافتند که مقاومت پوسته جدار نازک توام با ناکاملی بصورت موثری با استفاده جزئی از مصالح FRP در ناحیه ناکاملی افزایش می‌یابد و نتیجه گرفتند که این شیوه روشی منطقی و اقتصادی برای اصلاح و تقویت رفتار مخازن و پوسته‌های استوانه‌ای دچار ناکاملی است. [10]

وکیلی و شوکتی در زمینه تاثیر استفاده از حلقه تقویت کننده CFRP روی کمایش پافیلی پوسته‌های استوانه‌ای پژوهش انجام داده‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از CFRP برای تقویت پوسته‌ها تاثیر مثبت داشته و نشان داده شده است که این نوع تقویتی در محل ایجاد کمایش پافیلی بهترین نتیجه مقاوم‌سازی را می‌دهد [11].

هدف این مقاله بررسی مقاوم‌سازی پوسته‌های استوانه‌ای جدارنازک فولادی تقویت شده توسط حلقه‌های با مصالح CFRP می‌باشد. در این پژوهش از پنج عدد نمونه آزمایشگاهی و به موازات آن از نمونه‌های المان محدود و روابط تئوری و روابط آئین‌نامه‌ای استفاده شده است. برای انجام کار آزمایشگاهی از آزمایشگاه سازه‌های جدارنازک دانشگاه ارومیه استفاده شده است. برای انجام تحلیل‌های المان محدود از نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش پنج نمونه آزمایشگاهی مورد تحقیق قرار گرفته است. کلیه نمونه‌ها دارای قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰۰ میلی‌متر بوده و ضخامت نمونه‌ها برابر با ۰/۳ میلی‌متر است. متغیرهای آزمایشگاهی عبارتند از موقعیت نصب حلقه‌های CFRP و نیز تعداد لایه‌های CFRP. تعداد لایه‌های CFRP بر اساس تحلیل المان محدود بدست آمده است. تعداد لایه‌ها به اندازه‌ای در نظر گرفته می‌شود که حلقه

محوری روی نمونه‌ها جلوگیری شود و صرفاً بار جانبی وارد شود.

در شکل (۳) این سیستم نمایش داده شده است.

جدول ۱. مشخصات نمونه های آزمایشگاهی

Specimen	R (mm)	L (mm)	t (mm)	t_f (mm)	position of CFRP	number of CFRP strips
XC1	250	1000	0.3	without CFRP	without CFRP	without CFRP
XC2	250	1000	0.3	0.167	1/2 H	1
XC3	250	1000	0.3	0.501	1/2 H	3
XC4	250	1000	0.3	0.334	1/3 H, 2/3 H	2
XC5	250	1000	0.3	0.668	1/3 H, 2/3 H	4

Table 1. Specifications of the tested specimens

شکل ۱. نمونه های آزمایشگاهی A، B، C، D و E

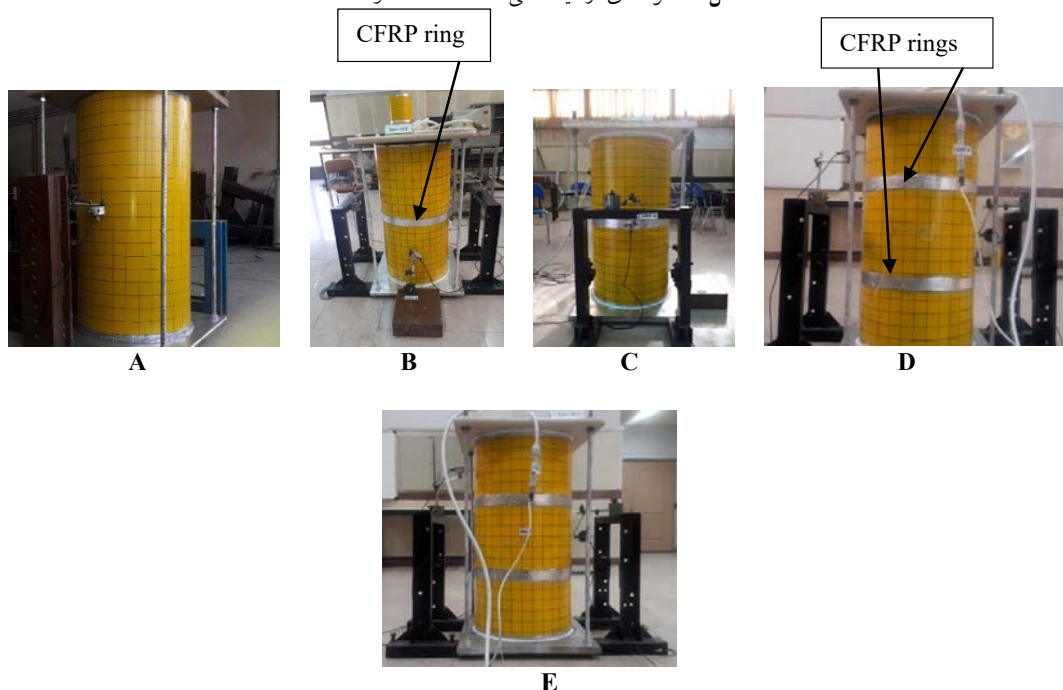


Fig. 1. A-E the Experimental Specimens

۳-۲- انجام آزمایش ها

نمونه های آزمایشگاهی XC1 الی XC5 بعد از ساخت و آماده سازی و نصب دستگاه های اندازه گیری که شامل یک عدد کرنش سنج افقی و سه عدد تغییر مکان سنج شعاعی است به نوبت توسط پمپ تخلیه هوا تحت بارگذاری فشار یکنواخت خارجی قرار می گیرند. نمودارهای فشار-کرنش این نمونه ها در شکل (۴) نشان داده شده است. کرنش سنج در همه نمونه ها در قسمت میانی ارتفاع نمونه نصب شده

است. LVDT ها نیز در نمونه XC1 هر سه در قسمت میانی نصب شده و در دو نمونه XC2 و XC3، LVDT1 تغییر مکان روی حلقه CFRP و LVDT2 در قسمت وسط نیمه پایین بوده و LVDT3 در قسمت وسط نیمه بالایی می باشد. را اندازه میگیرد. در دو نمونه XC4 و XC5، LVDT1 در قسمت وسط ثلث میانی بوده و LVDT2 بر روی حلقه پایینی و LVDT3 در قسمت وسط ثلث بالایی نمونه ها است.

شکل ۲. A. نمونه های آزمایش کشش، B. ابعاد نمونه های تست کشش، C. دستگاه تست کشش، D. دیاگرام تنش-کشش

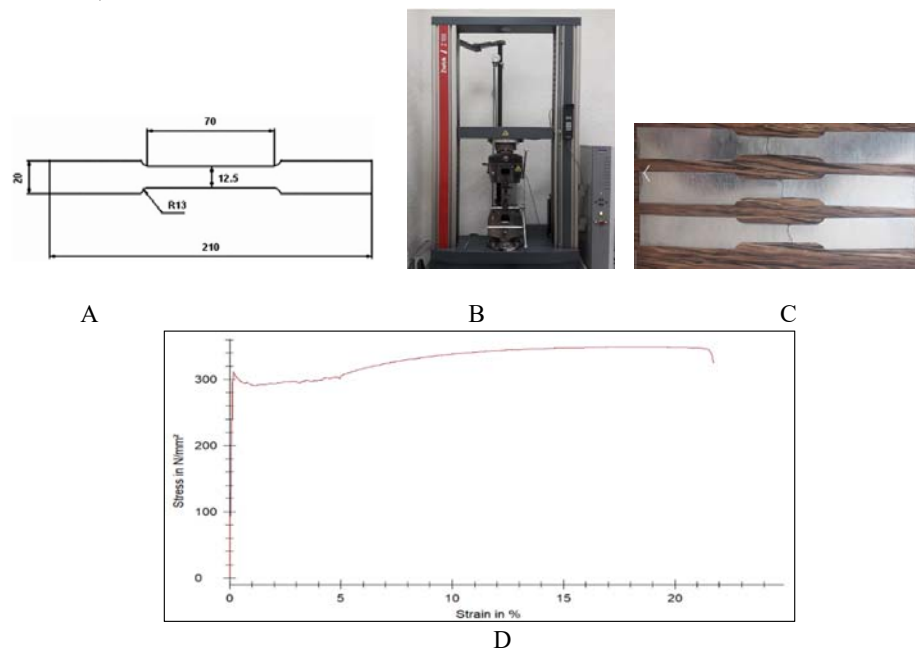


Figure 2. A. The three samples, B. Dimensions of tensile test samples, C. Tensile testing machine, D. Stress-Strain diagram of material

جدول ۲. مشخصات مکانیکی حاصل از تست کشش

Elastic Modulus	Yield Strength	Ultimate Strength	Rupture Strength	Ultimate Strain
190.43 MPa	326.945 MPa	361.07 MPa	304.67 MPa	19.015%

Table 2. Mechanical Properties of tensile testing specimens

شکل ۳. A. شکل شماتیک نمونه XC3 و رینگ CFRP، B. شرایط مرزی نکیه گاهی نمونه XC3, XC5

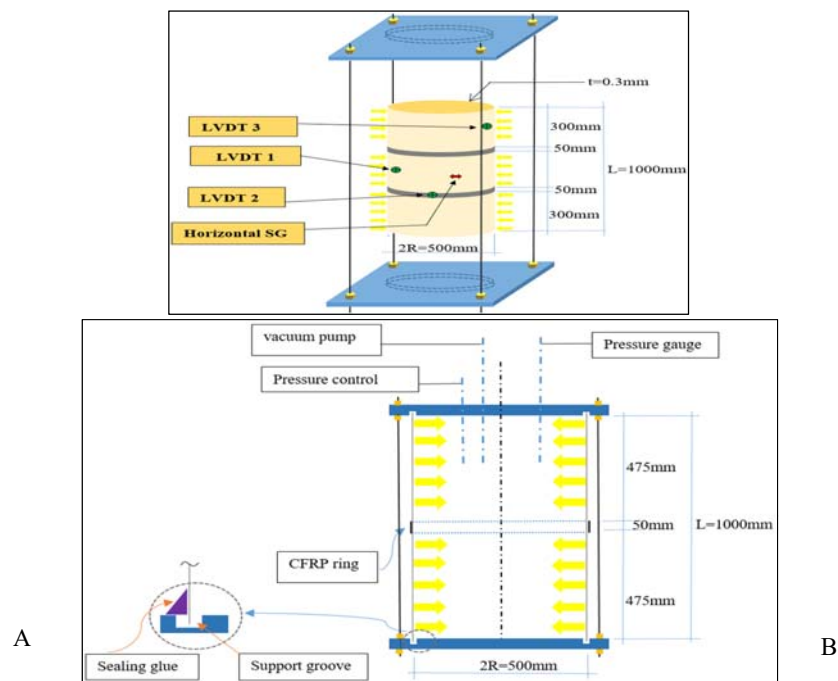
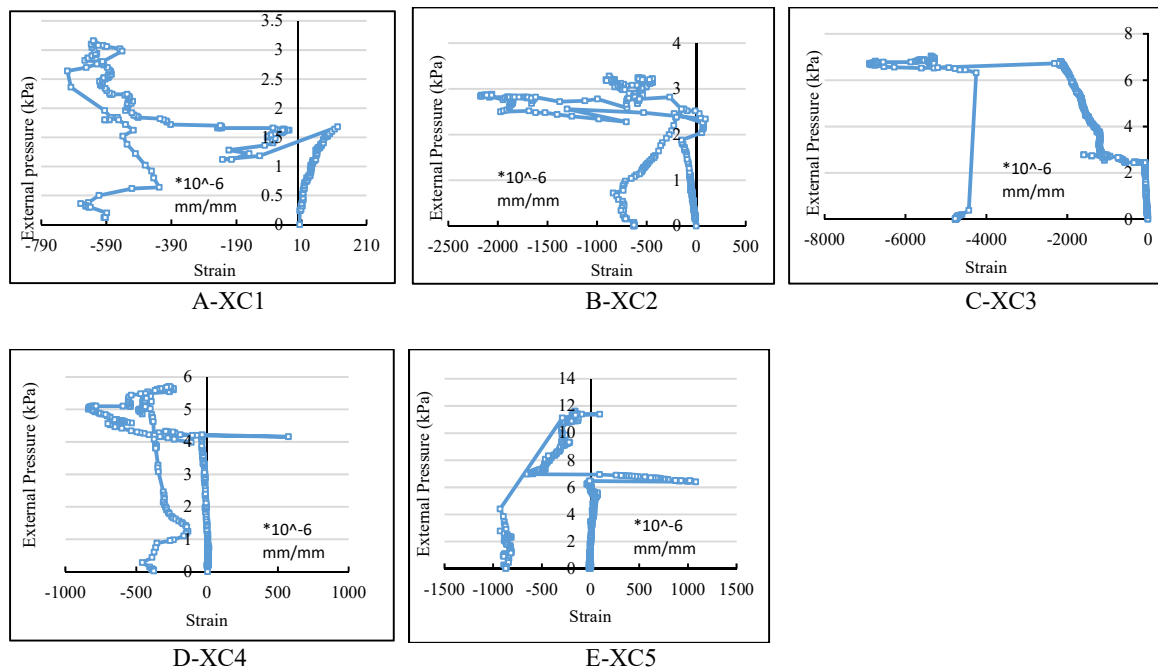


Fig. 3. A. Schematic illustration of the XC3, XC5 specimens and CFRP ring, B. boundary conditions of the XC3, XC5 specimens

شکل ۴. نمودار کرنش افقی نمونه های XC1 الی XC5

**Fig. 4.** The circumferential strain of the XC1-XC5 specimens

در نمونه‌های آزمایش شده تعداد شکل موج‌های محیطی در نمونه XC1 پنج عدد است. در نمونه XC2 در ابتدای بارگذاری که حلقه تقویتی می‌تواند در مقابل فشار وارد شده مقاومت کند، تعداد شکل موج ایجاد شده برابر ۸ عدد است. در ادامه بارگذاری به علت کم بودن تعداد نوارهای CFRP، حلقه نمی‌تواند مقاومت لازم را داشته باشد و دچار کماتش می‌شود و در نتیجه تعداد موج‌های ایجاد شده در نمونه نیز دچار تغییر می‌شود و به پنج عدد کاهش می‌یابد. در نمونه XC3 تعداد موج‌های محیطی در قسمت بالا و پایین نمونه برابر هفت عدد است. در نمونه XC4 در قسمت ثلث بالایی، هشت عدد و در قسمت میانی، هفت عدد، و در ثلث پایین تعداد موج ایجاد شده هشت عدد است. در نمونه XC5 تعداد موج‌های کماتشی در قسمت ثلث بالایی ۱۲ عدد و در قسمت میانی ۱۰ عدد و در قسمت ثلث پایینی ۱۱ عدد مشاهده شده است. شکل (۶) نمونه‌های آزمایشگاهی را بعد از انجام بارگذاری و ایجاد کماتش نشان می‌دهد. در همه نمونه‌ها اتمام آزمایش به علت جمع‌شدگی نمونه و خارج شدن لبه پوسته

قسمت ابتدایی نمودارهای فشار-کرنش به صورت خطی بوده تا اینکه نمونه‌ها شروع به کماتش کرده و در نهایت نمونه‌ها به حالت خرابی می‌رسند و آزمایش متوقف می‌شود. در همه نمودارهای کرنش بعد از مرحله کماتش شیب نمودارها کمتر شده است و مقدار کرنش افزایش می‌یابد و این نشان دهنده این است که فولاد محل نصب کرنش سنج به تسلیم رسیده است. از طرف دیگر مشاهده می‌شود که در نمونه‌های XC2 تا XC5 برای استفاده از حلقه‌های مقاوم‌سازی CFRP، کرنش‌ها نسبت به نمونه XC1 افزایش یافته‌اند.

در شکل (۵) نمودارهای تغییر مکان شعاعی در مقابل فشار خارجی برای نمونه‌های آزمایشگاهی نشان داده شده است. نمونه‌های XC1 الی XC5 به ترتیب در فشارهای ۱/۳، ۲/۱۲، ۲/۳۸، ۴/۳ و ۴/۵ کیلوپاسکال شروع به کماتش می‌کنند. و به ترتیب در فشارهای ۳/۱۴، ۳/۲۸، ۳، ۵/۷ و ۱۱/۶۲ کیلوپاسکال دچار خرابی می‌شوند

از محل شیار تکیه‌گاهی است که باعث نفوذ هوا به داخل نمونه می‌شود و بارگذاری کاهش یافته و متوقف می‌شود. تغییر مکان سنج LVDT1 در نمونه‌های XC2 و XC3 تغییر مکان شعاعی حلقه CFRP را اندازه ثبت کرده است. با توجه به مقدار تغییر مکان‌ها دیده می‌شود در نمونه XC2 مقادیر تغییر مکان کم است و این نشان دهنده سختی و مقاومت بالای حلقه CFRP است

شکل ۵. نمودار تغییر مکان شعاعی برای نمونه های XC1 تا XC5

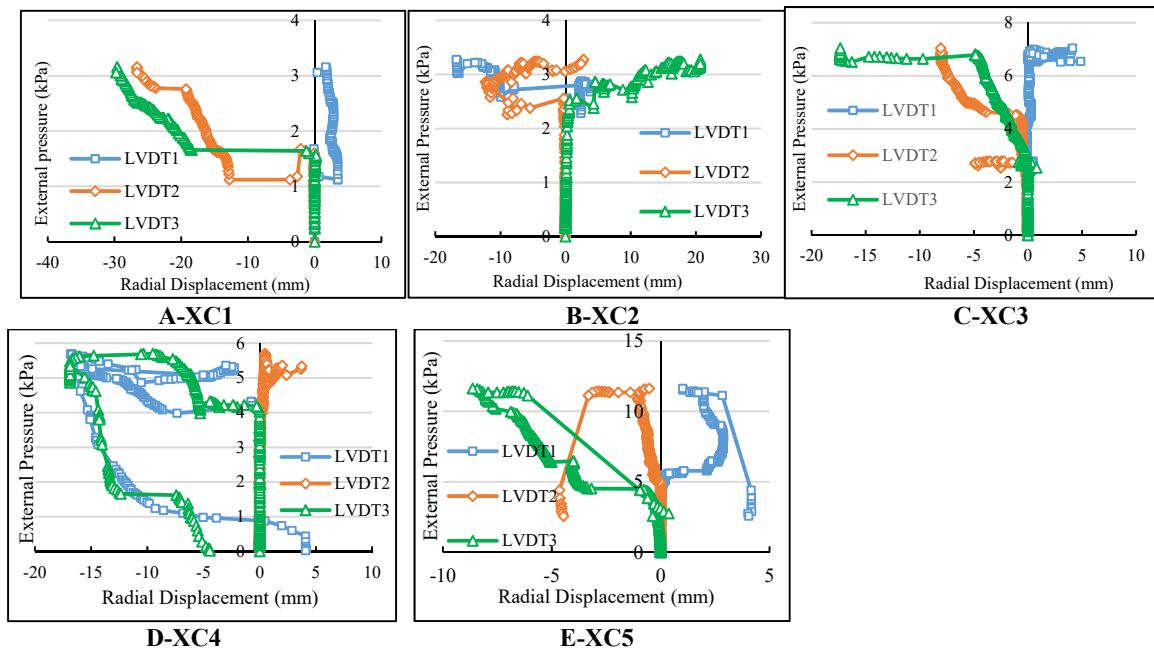


Fig. 5. The radial displacement diagram of the XC1-XC5 specimens

شکل ۶. اشکال A تا E حالت کمانش یافته و خرابی نمونه های XC1 تا XC5 بعد از بارگذاری

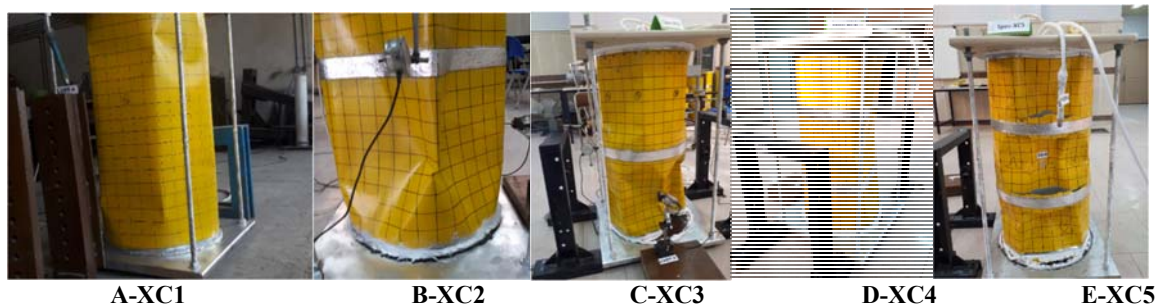


Fig. 6. A-E the XC1- XC5 specimens after buckling and failure

۴. تحلیل غیر خطی عددی

اختصاص ویژگی های فیزیکی مصالح شامل مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و خواص غیر خطی مصالح شامل نمودار تنش- کرنش پلاستیک مصالح، تنش تسلیم، و رفتار مصالح بعد از تسلیم است. در شکل (۷) منحنی تنش-کرنش تعریف شده برای کلیه نمونه ها نشان داده شده است. از آنجا که برای تحلیل غیرخطی نیاز به اعمال ناکاملی هندسی وجود دارد، بنابراین در ابتدا تحلیل خطی مقادیر ویژه برای بدست آوردن شکل مدهای کمانش انجام شده و سپس با توجه به مقادیر تغییر مکان بدست آمده از این تحلیل، ضرایبی از تغییر شکل های

روش المان محدود یکی از روش های تحلیل سازه است که مبتنی بر روش عددی می باشد. در این پژوهش از نرم افزار ABAQUS برای مدل سازی المان محدود استفاده شده است. برای مدل سازی نمونه های المان محدود از همان ویژگی های مصالح آزمایشگاهی استفاده می شود. برای مش بندی المان S4R استفاده شده است. این المان برای مش بندی پوسته های استوانه ای مناسب است. این المان یک المان پوسته استوانه ای با انحنا دو بعدی بوده که برای مدل های با کرنش های بزرگ مناسب است [13].

در شکل (۹) تاثیر استفاده از نوارهای CFRP در افزایش مقاومت کمانشی نمونه‌های المان محدود مشاهده می‌شود. مقاومت کمانشی نمونه EC1 که فاقد نوار تقویتی است کمترین مقدار را دارد و نمونه EC5 که دارای دو حلقه تقویتی و هر حلقه دارای چهار نوار CFRP است بیشترین مقاومت کمانشی را دارد.

۵. بررسی و ارزیابی نتایج

در بخش‌های ۳ و ۴ کارهای پژوهشی آزمایشگاهی و تحلیل غیرخطی نمونه‌ها آورده شد. در این بخش نتایج حاصل از بخش‌های قبلی به همراه روابط تئوری و آئین‌نامه‌ای بررسی می‌شود.

آئین‌نامه B.S.I 2009 کشور انگلستان، رابطه (۱) را برای محاسبه بار کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای ارائه نموده است. در محاسبه بار کمانشی توسط این رابطه نیاز به داشتن پارامتر ε است که این پارامتر بستگی به مقادیر $\frac{2R}{t}$ و همچنین $\frac{L}{2R}$ دارد [14].

$$P_{cr} = \frac{E t \varepsilon}{R} \quad (1)$$

آئین‌نامه EN-1993-1-4 اتحادیه اروپا رابطه (۲) را برای بدست آوردن مقدار ظرفیت کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای ارائه کرده است [15].

$$P_{cr} = 0.92 E \left(\frac{R}{L} \right) \left(\frac{t}{R} \right)^{2.5} \quad (2)$$

بر اساس رابطه تجربی که توسط نیروی دریایی ارتش آمریکا U.S. Navy (Raetz 1957) توسعه داده شده است، مقدار فشار مجاز از رابطه زیر محاسبه می‌شود [16].

$$P_{cr} = \frac{2.42 E (t/2R)^{2.5}}{(1 - \nu^2)^{3/4} [L/2R - 0.45(t/2R)^{1/2}]} \quad (3)$$

Brush و همکاران رابطه (۴) را جهت برآورد بار

کمانش پوسته‌های استوانه‌ای با تکیه‌گاه‌های ساده و تحت فشار خارجی جانبی ارائه نموده‌اند [17].

تحلیل مقادیر ویژه به عنوان ناکاملی اولیه برای تحلیل غیرخطی هندسی و مصالح اعمال شده است.

شکل (۸) نشان دهنده فرم کمانش یافته حاصل از تحلیل غیرخطی نمونه‌های المان محدود است. نمونه‌های تحلیل المان محدود به صورت EC1 تا EC5 نامگذاری شده‌اند. در شکل (۹) نمودار تغییر مکان شعاعی نمونه‌های المان محدود نشان داده شده است. چنانچه از شکل B-۸ دیده می‌شود حلقه CFRP در این نمونه یک عدد بوده و نتوانسته در مقابل کمانش نمونه مقاومت کند ولی در نمونه EC3 که شکل کمانشی آن شکل C-۸ است به علت اینکه از سه نوار CFRP استفاده شده است، حلقه تقویتی کاملاً در مقابل تغییر شکل مقاومت کرده و موجب تغییر شکل مد کمانشی محوری پوسته شده است.

در نمونه EC5 نیز به دلیل اینکه از چهار لایه CFRP در هر حلقه استفاده شده است، باعث مقاومت کامل حلقه شده و در نتیجه مد کمانش محوری پوسته تغییر کرده و مقاومت کمانشی پوسته افزایش یافته است.

شکل ۷. نمودار تنش-کرنش مصالح فولاد

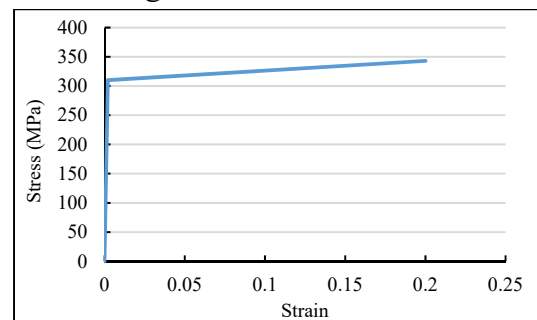


Fig. 7. Stress-strain graphs of steel materials

شکل ۹. نمودار فشار-تغییر مکان شعاعی، نمونه‌های EC1 تا EC5

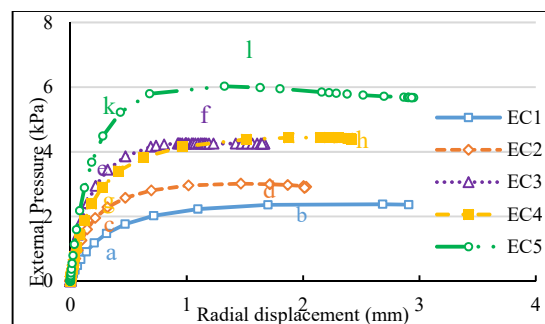


Fig. 9. Load deformation-radial displacement diagram of specimens obtained from numerical analysis

که در آن:

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}, \quad C = \frac{Et}{(1-\nu^2)}, \quad \bar{m} = \frac{\pi R}{L}$$

$$P_{cr} = \frac{1}{R} \left(\frac{(\bar{m}^2 + n^2)^2 \left(\frac{D}{R^2} \right)}{n^2} + \frac{\bar{m}^4}{n^2(\bar{m}^2 + n^2)^2} (1-\nu^2)C \right) \quad (4)$$

شکل ۸. تحلیل غیرخطی نمونه‌های المان محدود EC1 تا EC5 بعد از کماتش

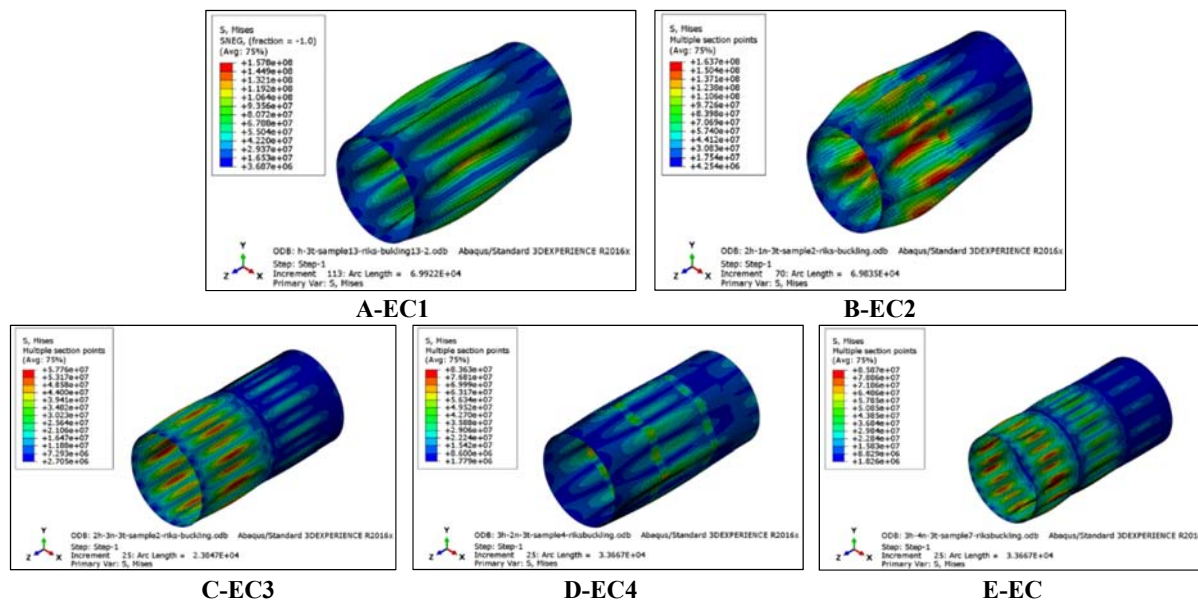


Figure 8. Numerical analysis model of specimens EC1-EC5 after buckling

رابطه (۷) که توسط Mann Jawad ارائه شده است همان رابطه (۲) ارائه شده توسط آئین‌نامه EN-1993-1-4 است [16]. جدول (۳) نشان دهنده مقاومت کماتشی نمونه‌های آزمایشگاهی بر اساس مقاومت اولیه کماتشی و مقاومت نهایی است. در این جدول ستون ۶ درصد افزایش مقاومت اولیه را نسبت به نمونه XC1 نشان می‌دهد و همچنین ستون ۷ درصد افزایش مقاومت نهایی را نسبت به مقاومت نهایی نمونه XC1 نشان می‌دهد. چنانچه از جدول (۳) دیده می‌شود با افزایش تعداد حلقه‌ها و تعداد نوارهای CFRP مقاومت کماتشی اولیه و مقاومت نهایی نمونه‌ها افزایش چشمگیری پیدا می‌کنند. در شکل (۱۰) نمودار مقاومت کماتشی نمونه‌های آزمایشگاهی برای مقایسه با مقاومت‌های بدست آمده از تحلیل غیرخطی المان محدود و روابط تئوری و آئین‌نامه‌ای ۱ الی ۴ نشان داده شده است.

جدول ۳. بار کماتشی و مقاومت نهایی نمونه‌های آزمایشگاهی

Specimens	Initial Buckling (k Pa)	Ultimate Strength (k Pa)	P_{ini}/P_{XC1}	P_{ult}/P_{XC1}	Difference (%)
-----------	-------------------------	--------------------------	-------------------	-------------------	----------------

تعداد شکل موج‌های محیطی پوسته استوانه‌ای از رابطه زیر بدست می‌آید [18].

$$n = \sqrt[4]{\frac{6\pi^2\sqrt{1-\nu^2}}{\left(\frac{L}{R}\right)^2 \left(\frac{t}{R}\right)}} \approx 2.74 \sqrt{\frac{R}{L}} \sqrt{\frac{R}{t}} \quad (5)$$

برای سازه‌های با نسبت (R/t) بزرگتر معادله (۳) به صورت زیر نوشته می‌شود [16]:

$$P_{cr} = \frac{2.42E}{(1-\nu^2)^{3/4}} \frac{(t/2R)^{2.5}}{(L/2R)} \quad (6)$$

با در نظر گرفتن مقدار ۳، برای ν رابطه (۶) به صورت رابطه (۷) برای مصالح فولادی بدست می‌آید [16].

$$P_{cr} = \frac{0.92E(t/R)^{2.5}}{L/R} \quad (7)$$

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
XC1	1.30	3.14	1.00	1.00	00	00
XC2	2.12	3.28	1.63	1.04	63	04
XC3	2.38	7.04	1.83	2.24	83	124
XC4	4.30	5.70	3.30	1.81	230	81
XC5	4.50	11.62	3.46	3.70	246	270

Table 3. Critical buckling load of the Experimental specimens

نمودار ۱۰. مقاومت کمانشی نمونه های آزمایشگاهی و المان محدود و روابط تئوری و آئین نامه

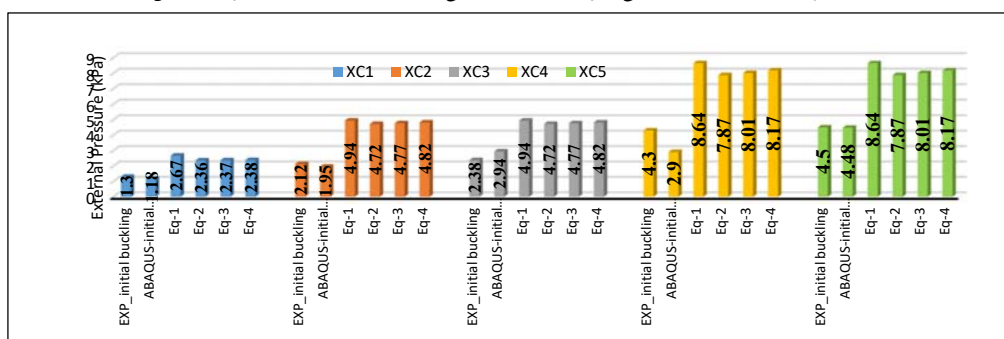


Fig. 10. Buckling strength of experimental specimens and finite element and theoretical relations and regulations

شرایط مساوی به تعداد و موقعیت نصب نوارهای استفاده شده در ساخت حلقه بستگی دارد و دیده شد که برای داشتن مقاومت بالا برای کمانش نکردن حلقه CFRP، لازم است که تعداد لایه های CFRP به اندازه کافی وجود داشته باشند. چنانچه دیده شد در نمونه های XC2 و XC4 به علت کم بودن تعداد لایه های CFRP، مقاومت کمانشی افزایش بالایی نشان نداد ولی در نمونه های XC3 و XC5 به علت دارا بودن تعداد لایه های CFRP کافی، به خوبی ظرفیت کمانشی پوسته را افزایش یافته و حلقه های CFRP در مقابل فشار خارجی کمانش نکرده و موجب افزایش ظرفیت نمونه ها شده اند.

با توجه به نتایج فوق می توان گفت استفاده از حلقه های CFRP می تواند برای استفاده در مقاوم سازی و افزایش مقاومت کمانشی مخازن و پوسته های جدارنازک فولادی مطرح باشد.

تشکر و قدردانی

از کلیه عوامل اجرایی دانشگاه ارومیه و بخصوص آقای مهندس عظیم زاده کارشناس آزمایشگاه سازه های جدارنازک دانشگاه ارومیه که در انجام کلیه مراحل آزمایش کمک و مساعدت کردند تشکر می شود.

اعلام تعارض منافع

نویسنده (نویسندگان) اعلام می کنند که هیچ نوع تعارض منافی وجود ندارد.

References

- [1] J.G. Teng, J.M. Rotter (2005). "Buckling of Thin Metal Shells" Taylor & Francis e-Library, London.
- [2] S.Aghajari, K.Abedi, H.Showkati, "Buckling and post-buckling behavior of thin-walled cylindrical steel shells with varying thickness subjected to uniform external pressure" Volume 44, Issue 8, August 2006, Pages 904-909.
- [3] Koiter, W.T. (1956). "Buckling and post-buckling behavior of a cylindrical panel under axial compression". Report S.476, National Luchtvaartlaboratorium (NLL) Amsterdam, Reports and Transactions, vol. 20.
- [4] N. Silvestre (2008). "Buckling behavior of elliptical cylindrical shells and tubes under compression" International Journal of Solids and Structures" volume 45, pages 4427-4447.

۷. مراجع

از شکل (۱۰) دیده می شود که مقاومت کمانشی اولیه نمونه ها از نمونه XC1 تا XC5 با افزودن حلقه CFRP به نمونه XC1 افزایش پیدا می کند به گونه ای که در نمونه XC5 ظرفیت کمانشی اولیه به ۴/۵ کیلو پاسکال می رسد در حالیکه در نمونه XC1 مقدار آن ۱/۳ کیلو پاسکال بدست آمده است. از شکل (۱۰) دیده می شود که مقادیر بدست آمده از تحلیل المان محدود با مقادیر بدست آمده از آزمایش ها هماهنگی خوبی دارد. شکل (۱۰) نشان می دهد که روابط تئوری و آئین نامه ای مقادیر ظرفیت کمانشی پوسته های استوانه ای را زیاده تر از مقادیر آزمایشگاهی برآورد می کنند. لازم به ذکر است این موضوع در پژوهش های آزمایشگاهی که توسط آقای توحید قنبری قازانچایی و همکاران [19] انجام داده اند گزارش شده است. ارائه ظرفیت بیشتر توسط روابط تئوری و آئین نامه ای می تواند به دلیل

۱. فرض رفتار الاستیک در روابط تئوریک باشد و
۲. در نظر گرفتن هندسه به صورت ایده آل و نیز در نظر نگرفتن ناکاملی باشد، در حالیکه در نمونه های آزمایشگاهی قطعاً ناکاملی وجود دارد.
۳. در نظر نگرفتن واقعیتهای ناشی از جوشکاری که ایجاد تنش های پس ماند می کند
۴. شرایط آزمایشگاهی تکیه گاهی و شرایط بارگذاری آزمایشگاهی

که همه می توانند روی اضافه برآورد روابط تئوری و آئین نامه ای موثر باشند.

۵. نتیجه گیری

در این پژوهش قابلیت استفاده از نوارهای CFRP برای مقاوم سازی پوسته های استوانه ای جدار نازک فولادی بررسی آزمایشگاهی و المان محدود غیرخطی و روابط تئوری و آئین نامه ای قرار گرفت و نتایج آن در بندهای قبلی ارائه شد. از آنچه انجام شد مشاهده کردیم که استفاده از حلقه های CFRP به صورت موثری می تواند ظرفیت کمانشی اولیه و مقاومت نهایی پوسته های استوانه ای را افزایش دهند. مقدار این افزایش در

- [18] H. Showkati, P. Ansourian, Influence of primary boundary conditions on the buckling of shallow cylindrical shells, *Jo Constr Steel Res* 1996; 36:53–75.
- [19] T. Ghanbari Ghazijahani, H. Sadighi Dizaji, J. Nozohor, T. Zirkian, Experiments on corrugated thin cylindrical shells under uniform external pressure, *Ocean Engineering* 106(2015)68–76.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.06.057>
- علائم و اختصارات:
- D = سختی خمشی ورق
- E = مدول الاستیسیته در جهت محورهای اصلی
- CFRP = Carbon fiber reinforced polymer - الیاف پلیمری
- تقویت شده
- L = ارتفاع پوسته استوانه ای
- N = تعداد لایه های CFRP
- P_{cr} = ظرفیت کمانشی الاستیک پوسته های استوانه ای
- R = شعاع پوسته استوانه ای
- t = ضخامت پوسته استوانه ای
- t_f = ضخامت حلقه CFRP
- ε = پارامتری جهت محاسبه بار کمانشی در آئین نامه EN-1993-1-4
- ν = ضریب پواسون
- [5] Dowling, P.J. and Harding, J.E. (1982). "Experimental behaviour of ring and stringer stiffened shells In Buckling of Shells in Offshore Structures" (eds J.E. Harding, P.J. Dowling and N. Agelidis). Granada, London, pp. 73–107.
- [6] Paweł Forýś (2015). " Optimization of cylindrical shells stiffened by rings under external Pressure including their post-buckling behavior" Volume 95, October, Pages 231–243.
- [7] Lvov, Gennadiy & Alexandru, Pupazescu & Beschelnikov, Dima & Zaharia, Maria. (2015). Buckling Analysis of a Thin-walled Cylindrical Shell Strengthened by Fiber - reinforced Polymers. *MATERIALE PLASTICE*. 52. 28-31.
- [8] D. Fernando; T. Yu; and J. G. Teng (2014). "Behavior of CFRP Laminates Bonded to a Steel Substrate Using a Ductile Adhesive." *Journal of Composites for Construction*/Volume 18 Issue 2 - April. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000439.
- [9] J. G. Teng and Y. M. Hu (2004) "Suppression of local buckling in steel tubes by FRP jacketing" *FRP Composites in Civil Engineering - CICE, Proceedings of the 2nd International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, Pages 749–753.
- [10] M. Batikha, J.F. Chen and J.M. Rotter (2007). "Elastic buckling of frp-strengthened cylinders with axisymmetric imperfections" *Asia-Pacific Conference on FRP in Structures (APFIS)*.
- [11] Morteza Vakili and Hossein Showkati (2016). "Experimental and Numerical Investigation of Elephant Foot Buckling and Retrofitting of Cylindrical Shells by FRP" *Journal of Composites for Construction*, MAY, Volume 112, Pages 256-264.
- [12] EPR 3301, (2019), QUANTOM®, <http://quantom.co.uk/wp-content/uploads/2019/03/EPR-3301.pdf>
- [13] ABAQUS, Version 6.16 ABAQUS/Standard User's Manual, ABAQUS Inc., US, 2016.
- [14] BSI, 2009. Specification for Unfired Fusion Welded Pressure Vessels, 4th ed. British Standards Institution, UKPD5500.
- [15] CEN, the European Committee for Standardization. (2007). "Eurocode 3 -Design of steel structures -Part 4-1: Silos." European Standard EN 1993-4-1. Brussels, Belgium.
- [16] M.H. Jawad, Theory and Design of Plate and Shell Structures, Chapman & Hall Inc, 1st edition, 1994.
- [17] D.O. Brush, B.O. Almorth, Buckling of bears plates and shells, Mc Grow Hill, New York, 1975. <https://www.amazon.com/Buckling-Bars-Plates-Shells-Brush/dp/0070085935>

Buckling reinforcement of Steel Thin-Walled Clindrical Shells by CFRP Rings Under Uniform Lateral Pressure Loading

Sirus Yousefi Khatuni^{1*}, Hossain Showkati²

1. PhD Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Iran

2. Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Iran

s.yosefikhhatuni@urmia.ac.ir

Abstract:

Buckling of thin-walled structures is an important issue. Thin wall shells have many applications. The refinement of fuel and fluid storage tanks is very valuable. The important points of the thin-walled cylindrical shells are the little thickness of the shell relative to the other dimensions of these structures. This feature places the instability issue as a determining factor in the behavior of these structures. Due to the low thickness and compressive strength of the field, the forces on the shell of these structures are more likely to be buckling. Researchers have always tried to increase the buckling strength of thin-walled cylindrical shells by recognizing the behavior of different types of materials and their geometry types, thus maximizing the use of existing structures. The conventional method is to use steel rings to retrofit steel cylindrical shells. However, the use of this method according to the conditions of the workshop and that the structure may be load-bearing and carrying flammable liquids is due to the use of welding with fire hazards and practically there will be no use of this method in these structures. So according to the above topic, in this research, the benefits of using CFRP as new materials have been considered. In this paper CFRP rings are used to replace steel reinforcement rings. Here, the use of these materials has been investigated for the reinforcement of thin-walled cylindrical shells under uniform lateral pressure. This type of loading is generally caused by the discharging of cylindrical shells and reservoirs. In this paper, CFRP rings were used as reinforcement against the buckling of thin-walled steel cylindrical shells and at certain locations at shell height. Five specimens have been manufactured and used for testing. The first experimental specimen is without ring reinforcement. The second and third specimens have a reinforcing ring in the middle of specimen high. The number of CFRP layers in the XC2 specimen is half the XC3 specimen. The fourth and fifth specimens have two reinforcing rings in one third and two-thirds of the height of the specimens. The number of CFRP layers is based on the results obtained from the nonlinear numerical analysis. The number of layers is chosen so to stop CFRP ring buckling. The external uniform pressure is used as specimens loading by employing a vacuum pump. ABAQUS software has been used for nonlinear analysis. The results of the experiments show that the CFRP rings greatly increase the buckling and post-buckling strength of the thin-walled shells. Therefore, the use of CFRP rings is being proposed as an alternative method for the reinforcement of these structures. experimental results show that the XC5 specimen, which has two CFRP rings, has the highest buckling strength compared to other specimens. The results show that buckling strength of cylindrical shells increases with increasing number of rings and number of layers. In this research, theoretical relations, as well as the code relations of the United Kingdom and the European Union, have been used to assess the obtained results and a good agreement achieved.

keywords: Shell Reinforcement, Thin-Walled Cylindrical Shell, Buckling Capacity, CFRP Materials, Uniform Lateral Pressure.