

کمانش پوسته‌های استوانه‌ای کوتاه قامت فولادی تحت بارگذاری عرضی

شروین ملکی^{۱*}، علیرضا معززی مهر طهران^۲

۱- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

۲- دانشجوی دکتری پیوسته دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

*smaleki@sharif.edu

تاریخ دریافت: [۹۶/۳/۲۲]

تاریخ پذیرش: [۹۶/۱۲/۹]

چکیده

مخازن استوانه‌ای جداره نازک فولادی به دلیل ضخامت کم دیواره، مستعد کمانش تحت بارهای وارد شده است. بار باد و زلزله از جمله بارهایی هستند که باعث بارگذاری عرضی بر سازه می‌شود. در این مطالعه رفتار مخازن دانه‌ای کوتاه قامت تحت سه توزیع فشار عرضی بررسی شده است. این سه توزیع فشار در نظر دارد، فشار لرزه‌ای ناشی از محتویات دانه‌ای بر دیواره سازه را نمایندگی کند. آیین‌نامه اروپا در زمینه مقاومت و پایداری پوسته‌ها، از پیشروترین آیین‌نامه‌های بین‌المللی در این حیطه است. روش تحلیل که برگرفته از این آیین‌نامه است، پایداری استاتیکی این نوع مخازن را با انجام انواع تحلیل‌های خطی و غیرخطی کمانشی ارزیابی می‌نماید. تحت بارگذاری انجام شده در این مطالعه، دو مدل کمانشی پای فیل و چین‌خوردگی مورب برشی در پای سازه، در مخازن کوتاه قامت مشاهده می‌شود. این پژوهش ضمن معرفی روش تحلیل آیین‌نامه اروپا، اطلاعات ارزشمند دیگری نیز در تأثیر وقوع پلاستیسته و وجود نقص یا اعوجاج سازه از هندسه استوانه‌ای، در مقاومت کمانشی ارائه می‌نماید.

واژگان کلیدی: پوسته‌های استوانه‌ای کوتاه قامت، کمانش، بار عرضی، آیین‌نامه اروپا، نقص هندسی

۱- مقدمه

پوسته‌های استوانه‌ای جداره نازک فولادی از سازه‌های متداول در صنایع به‌شمار می‌آیند. طیف متنوعی از این ساختار در زمینه‌های وابسته به صنایع دریایی، هوافضا، صنایع مکانیکی، عمران، کشاورزی و موارد مشابه دیگر مشاهده می‌شود. به فراخور محل استفاده و بارهای وارد بر آن، نوع خاصی از کنترل و طراحی سازه مطرح می‌شود. بدلیل مستعد بودن کمانش در پوسته‌ها، طراحی براساس مقاومت کمانشی،

همواره تعیین کننده بوده است. روش‌های حل تحلیلی پوسته‌های متقارن، تحت بارهای متداول و ساده‌ی فشار محوری یکنواخت، فشار خارجی و پیچش از گذشته مورد توجه بوده و همچنان نیز ادامه دارد. ساده‌ترین روش انجام آزمایش بر پوسته‌های استوانه‌ای نیز مربوط به این سه مورد می‌شود [1]. در بیشتر موارد، طراحی پوسته‌ها از طریق محاسبات دستی، با استفاده از عبارات جبری و براساس مقاومت کمانشی الاستیک انجام می‌شود. این عبارات بیشتر بر اساس موارد تجربی و به

عنوان حد پایین آزمایش‌ها مرتبط در نظر گرفته شده‌اند [2]. با توجه به آزمایش‌های اندک که طیف بارگذاری محدودی را پوشش می‌دهند، بسیاری از موارد کاربردی که پوسته‌ها در واقعیت تجربه می‌کنند، از نتایج آزمایشگاهی موجود دور هستند [1,2]. حتی ترکیب بارهای ساده که باعث ایجاد تنش‌های غشایی از نوع فشار محوری، فشار پیرامونی و برشی می‌شود نیز بطور هم‌زمان کمتر مورد توجه بوده است [3]. در کنار بارگذاری‌های ساده‌تر اشاره شده، مخازن استوانه‌ای ممکن است تحت بارهای عرضی قرار گیرند که باعث ایجاد برش و خمش در سازه می‌شوند. بررسی کمانشی تحت ترکیب بارهای برشی و خمشی به گزارش اولیه‌ی لاندکویست [4] برمی‌گردد. اطلاعات بیشتری در این باره در مرجع [5] ارائه شده است. گالتلی و بلاچات [6] به کمک بررسی نتایج آزمایشگاهی مخازن استوانه‌ای کوتاه قامت تحت بارگذاری افقی بر لبه‌ی مخزن، رابطه‌ای ساده در تخمین شروع کمانش پلاستیک آن‌ها پیشنهاد کردند. مطالعه اخیر که بر مخازن پُر شده از آب متمرکز بوده است، سعی بر در نظرگیری استاتیکی شرایط زلزله از طریق بار برشی بر لبه مخزن را داشته است. کواکبو و همکاران [7] با استفاده از روش المان محدود، به بررسی کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارهای محوری، خمشی و برشی پرداختند. در این پژوهش عددی، تأثیر هر یک از بارهای خمشی و محوری بر رفتار کمانشی سازه تحت برش بررسی شده است. همچنین آثار نقص¹ هندسی استوانه در پایداری آن نیز لحاظ شده است. میشل [8] پایداری دینامیکی و استاتیکی پوسته‌های استوانه‌ای تحت بار برشی را از طریق عددی و آزمایشگاهی انجام داد. مطالعه اخیر که بیشتر رویکرد دینامیکی دارد، عدم حساسیت کمانش برشی به نقص هندسی را تایید کرد. در مرجع [7] نیز حساسیت کمتر کمانش برشی در قیاس با کمانش محوری به نقص هندسی، اشاره شده بود. در امتداد مطالعات انجام گرفته در پایداری پوسته‌های استوانه‌ای، با توجه به گسترش روش‌های عددی و المان محدود، امکان ارزیابی انواع بارگذاری‌ها و شکل‌های متفاوت پوسته‌ها فراهم آمده است. به موازات این امر، آیین-

نامه اروپا [9] در مقاومت و پایداری پوسته‌ها، سه روش ارزیابی به کمک نتایج تحلیل المان محدود را در طراحی این سازه‌ها ارائه می‌نماید. این سه روش در قسمت‌های بعدی به-طور مختصر توضیح داده می‌شود. در همین راستا، گتلی و اشنایدر [10] به ارزیابی پایداری استوانه‌های جداره نازک به کمک نرم‌افزار المان محدود، تحت بار عرضی بر لبه بالایی آن پرداختند. آن‌ها به‌طور مشخص کفایت روش‌های عددی آیین‌نامه اروپا [9] را مطالعه کردند. علاوه بر موارد فوق، مطالعات مرتبط با پایداری مخازن و تانک‌ها که در معرض بارگذاری باد هستند، مطرح است. یکی از اولین مطالعات در این زمینه با بهره‌گیری از روش‌های کامپیوتری، پژوهش انسوریان [11] است که ضمن ارائه روش ساده طراحی در مقابل کمانش سیلوها و تانک‌های ذخیره در اثر باد، مزیت استفاده از تحلیل رایانه‌ای المان محدود را مورد تأکید قرار می‌دهد. از نمونه‌های متأخر می‌توان به پژوهش چن و روتر [12] در رابطه با پوسته‌های استوانه‌ای با ضخامت ثابت جداره، تحت بار باد مطابق آیین‌نامه اروپا [13] اشاره کرد. در این مطالعه آثار لاغری، شکل و میزان نقص هندسی در مقاومت کمانشی سیلوها و تانک‌ها تبیین شده است. مطالعه مشابه دیگری توسط ژاؤ و همکاران [14] در پایداری سیلوهایی کف تخت تحت ترکیب بار آیین‌نامه اروپا [15] انجام شده است. رفتار کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارهای نواری² در راستای ارتفاعی مخازن، به صورت فشار داخلی و خارجی، توسط سادوسکی و روتر [16] بررسی شده است. بارهای نواری سعی بر نمایندگی بارهایی چون گرادیان حرارتی ناشی از تابش آفتاب به یک سمت مخزن، بار باد و یا بارهای ناشی از تخلیه با خروج از مرکزی سیلوها را دارند. طی این مطالعه حساسیت کمانشی پوسته‌ها برای اعمال فشار (به سمت داخل یا خارج از پوسته) مشاهده شد. همچنین به تازگی فاجویتان و همکاران [7] به مطالعه کمانش پوسته‌های استوانه‌ای بسیار کوتاه تحت خمش یکنواخت پرداختند. آن‌ها آثار نقص هندسی و شرایط تکیه‌گاهی را مورد بررسی قرار دادند. علاوه بر بار باد، بار ناشی از زلزله بر

در کنار آن روش‌های تحلیل پوسته‌ها طبق جدول (۱) ارائه شده است. متناسب با هر حالت حدی یک یا چند روش تحلیل مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مورد حالت حدی کماتش، که در آن تمام یا قسمتی از سازه به طور ناگهانی متحمل تغییر شکل‌های بزرگ نرمال بر سطح پوسته می‌شود، تنش‌های غشایی ایجاد شده در جداره، باعث از دست دادن باربری می‌شود. انواع تحلیل‌های جدول (۱) در رابطه با حدکوماتش قابل استفاده است.

جدول ۱. روش‌های تحلیل کماتشی پوسته‌ها در آیین‌نامه اروپا [9].

No.	Type of analysis	Shell theory	Material law	Shell geometry
1	Membrane theory of shells	membrane equilibrium	not applicable	perfect
2	Linear elastic shell analysis (LA)	linear bending and stretching	linear	perfect
3	Linear elastic bifurcation analysis (LBA)	linear bending and stretching	linear	perfect
4	Geometrically non-linear elastic analysis (GNA)	non-linear	linear	perfect
5	Materially non-linear analysis (MNA)	linear	non-linear	perfect
6	Geometrically and materially non-linear analysis (GMNA)	non-linear	non-linear	perfect
7	Geometrically non-linear elastic analysis with imperfections (GNIA)	non-linear	linear	imperfect
8	Geometrically and materially non-linear analysis with imperfections (GMNIA)	non-linear	non-linear	imperfect

Table 1. Types of shell analysis in Eurocode 3[9].

این آیین‌نامه بندهای متعددی در تحلیل سراسری^۴ سازه‌های پوسته‌ای به کمک تحلیل المان محدود دارد. به طور کلی سه روش در این راستا اجازه داده شده است: تحلیل خطی (ردیف ۲ جدول ۱) که در آن برآیند تنش‌ها، با مقادیر محاسبه شده دستی به وسیله عبارات جبری ساده، مقایسه می‌شود؛

مخازن نیز در زمره بارهای عرضی است. چندین مطالعه [20-18] در بررسی رفتار کماتشی مخازن آب تحت بار زلزله وجود دارد؛ اما تنها تعداد معدودی پژوهش در پایداری مخازن ذخیره آب تحت بار زلزله وجود دارد [22,21] که همزمان روش آیین‌نامه اروپا [9] را دنبال کرده‌اند. این امر در مورد مخازن ذخیره مواد دانه‌ای عملاً محدود بوده و طی مطالعه گسترده ادبیات فنی، تنها به طور مختصر در یک پژوهش [23] به آن اشاره شده است. از این رو، مقاله حاضر سه نوع بارگذاری عرضی بر مخازن جداره نازک کوتاه قامت (نسبت ارتفاع به قطر کوچکتر و مساوی یک و نسبت شعاع به ضخامت بزرگتر از صد [15]) را بررسی می‌نماید. این سه بارگذاری در نظر دارد، فشار لرزه‌ای ناشی از محتویات دانه‌ای بر دیواره سازه را نمایندگی کند. روش تحلیل که برگرفته از آیین‌نامه اروپا [9] است، پایداری استاتیکی این نوع مخازن را با انجام انواع تحلیل‌های خطی و غیرخطی کماتشی ارزیابی می‌نماید. اگرچه ماهیت زلزله، بارگذاری چرخه‌ای روی سازه است، اما مشخصاً رویکرد استاتیکی به عنوان حد پایین در این زمینه مطرح است [5]. در انتخاب شکل بارگذاری، فرم کلی توزیع اضافه فشار لرزه‌ای پیشنهاد شده در آیین‌نامه اروپا [24]، در نظر بوده است. در این مقاله، ارزیابی رفتار کماتشی مخازن استوانه‌ای کوتاه قامت تحت سه بارگذاری عرضی، با در نظرگیری آثار پلاستیسیته و نقص هندسی بر ظرفیت باربری کماتشی سازه، با جزئیات ارائه شده است. این پژوهش که در سطح بین‌المللی کاملاً نوین و پیشرو قلمداد می‌شود، روش آیین‌نامه اروپا [9] در مطالعه پایداری پوسته‌ها را نیز معرفی می‌نماید.

۲- روش تحلیل و مدل‌سازی

۲-۱- روش‌های تحلیل آیین‌نامه اروپا [9] در پایداری پوسته‌ها

در آیین‌نامه اروپا [9] در تحلیل مقاومت و پایداری پوسته‌های فولادی ۴ حالت حدی^۱ در نظر گرفته شده است: حد پلاستیک^۲، پلاستیسیته سیکلی^۳، کماتش^۴ و خستگی^۵.

4 buckling

5 fatigue

6 global analysis

1 limit state

2 plastic limit

3 cyclic plasticity

ثابت است. منظور از فشار در سراسر این مقاله، فشار رو به خارج و عمود بر جداره مخزن است. در حالت ۱ توزیع فشار یکنواخت واحد (بیانگر فشار مواد دانه‌ای در حالت ایستا) بعلاوه توزیع فشار واحد با تغییرات $\cos\theta$ (بیانگر فرم توزیع اضافه فشار لرزه‌ای آیین‌نامه اروپا [24] در نظر گرفته شده است. زاویه θ در شکل (۱) مشخص شده است. در حالت ۲ با ثابت نگه داشتن قسمت فشار یکنواخت، اضافه فشار لرزه‌ای بر یک سمت جداره و با دامنه ۲ برابر وارد می‌شود. در حالت ۳ نیز با ثابت نگه داشتن حالت ۲، فشار واحد یکنواخت کاملاً حذف می‌شود. به این طریق ضمن بررسی تأثیر وجود فشار یکنواخت داخلی، در هر ۳ حالت، برآیند بار عرضی یکسان می‌ماند.

شکل ۱. توزیع فشارهای در نظر گرفته شده بر جداره پوسته استوانه‌ای (تصویر پلان).

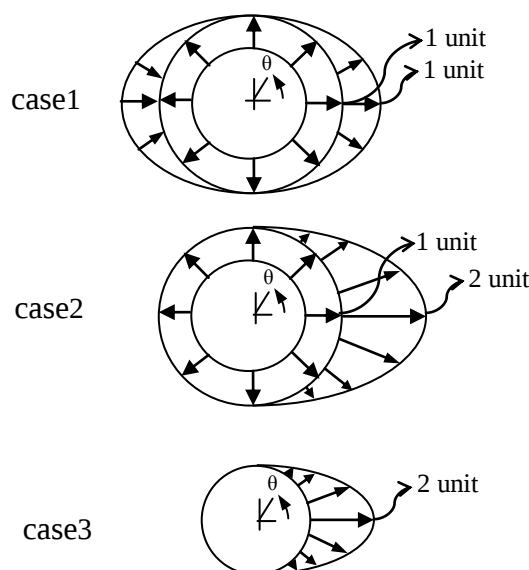


Fig. 1. Pressure distributions on the cylindrical shell wall (plan view).

مخزن جداره نازک مورد مطالعه به کمک نرم‌افزار المان محدود آباکوس [26] مدل شده است. با توجه به ماهیت سازه‌های پوسته‌ای دوبرگانه^۱ همچون مخازن استوانه‌ای [27]، جداره و سقف سازه هر دو به وسیله المان پوسته ۴ گره‌ای دوبرگانه (S4R) ساخته شده است. نسبت ارتفاع به

تحلیل توسعه یافته غیرخطی (ردیف ۸ جدول ۱) با در نظرگیری ویژگی‌های غیرخطی مصالح و هندسه که در آن نقص هندسی نیز به شکلی مناسب لحاظ شده است؛ و تحلیل سطح میانه که به ارزیابی دو مقاومت بایفرکیشن خطی (ردیف ۳ جدول ۱) و حد پلاستیک (ردیف ۵ جدول ۱) نیاز دارد. به سبب حساسیت کمانش پوسته‌ها به شکل و دامنه نقص هندسی، که خود وابسته به شرایط تنش است، روش تحلیل توسعه یافته غیرخطی دشوار و نیازمند دقت فراوان است [25]. اطلاعات بیشتری در رابطه با سایر تحلیل‌های جدول (۱) در آیین‌نامه [9] موجود است. در پژوهش فعلی، مطالعه گسترده‌ای روی مخازن کوتاه قامت، تحت سه توزیع فشار پیشنهادی (در بخش بعدی، توزیع فشارها به طور کامل تبیین شده است)، صورت گرفته است. بر این اساس با انجام انواع تحلیل‌های ردیف ۳ الی ۸ جدول (۱)، اطلاعات مفیدی از رفتار کمانشی این سازه ارائه شده است.

۲-۲- بارگذاری و مدل‌سازی المان محدود

مطالعات روی سیلوها و تانک‌ها تحت بارگذاری باد و تخلیه‌ی با خروج از مرکزی، نشان داده است که کاهش موضعی فشار وارد بر دیواره مخازن در پایداری آن‌ها بسیار مؤثر بوده و حتی می‌تواند از افزایش موضعی فشار نیز زیان‌بارتر باشد [16]. در شرایط لرزه‌ای، محتویات دانه‌ای مخازن ممکن است در اثر تحریک ایجاد شده، از یک طرف دیواره به طرف مخالف تمایل پیدا کنند. کاهش فشار دانه‌ها در یک سمت و افزایش فشار در سمتی دیگر، شرایطی شبیه به آنچه در بالا بیان شد، یعنی کاهش و افزایش موضعی فشار را توأمأ در جداره مخزن پدید می‌آورد. هنوز توزیع فشار دقیق و پذیرفته شده‌ای در توصیف این وضعیت وجود ندارد. آیین‌نامه اروپا [24] نوعی اضافه فشار لرزه‌ای را در این حالت پیشنهاد کرده است. براین اساس و به فرم تابع کسینوسی، بر فشار یک سمت دیواره افزوده و از سمت مقابل کاسته می‌شود، اما هیچگاه مکش در جداره مخزن نباید ایجاد شود. با توجه به توضیحات فوق سه توزیع فشار ساده‌سازی شده مطابق شکل (۱) (توزیع فشار در پلان) در این مطالعه در نظر گرفته شده است که از این پس به ترتیب حالت ۱ الی ۳ نامیده می‌شود. در تمامی حالت‌های ۱ الی ۳، توزیع فشار در ارتفاع مخزن

ادامه به نام «مُد (الف)»^۱ و شکل مُد دیگر، به نام «مُد (ب)»^۲ خوانده می‌شود. اطلاعات بیشتری در مورد اعمال نقص هندسی با استفاده از مُدهای کمانشی توسط تِنگ و سانگ [31] ارائه شده است. در اینجا بیشتر به معرفی شکل مُدهای کمانشی پرداخته می‌شود. اطلاعات تکمیلی و اثر هر مُد در مقاومت کمانشی، در قسمت‌های بعد بیشتر روشن می‌شود. در شکل (۲) هر یک از مُدهای (الف و ب) و برای حالت‌های بارگذاری ۱ الی ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲. مطالعه همگرایی مش‌ها نسبت به بهبود بار کمانشی مُد اصلی در حالت ۱.

No.	Total no. of elements	LBA: load factor ($\times 10^{-5}$) [N/m ²]	Element refinement %	Improvement %	(Improvement/Refinement) %
1	5089	2.58			
2	6424	2.48	26.2	4.03	15.4
3	8944	2.38	39.2	4.20	10.7
4	11880	2.32	32.8	2.59	7.9
5	14332	2.30	20.6	0.87	4.2

Table 2. Mesh convergence study with respect to buckling load improvement of the main mode in case1.

جدول (۳) مقادیر بار بحرانی متناظر هر مُد، ناشی از تحلیل بایفرکیشن را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در جدول (۳) منعکس است، مقدار بار بحرانی کمانش در مُد اصلی (مُد (الف)، از حالت ۱ به ۳ روبه کاهش است؛ حال آنکه مُد (ب)، در بار بحرانی تقریباً مشابهی در هر سه حالت، رخ می‌دهد.

جدول ۳. مقادیر بارکمانشی ناشی از تحلیل بایفرکیشن در مُد (الف و ب).

Load pattern	LBA: load factor [N/m ²]- mode(a)	LBA: load factor [N/m ²]- mode(b)
CASE1	229678	291348
CASE2	150389	273171
CASE3	99452	270808

Table 3. LBA buckling load in mode (a) and (b).

قطر مخزن برابر ۱ انتخاب شده است. مقدار ضخامت جداه ثابت بوده و نسبت شعاع به ضخامت پوسته برابر ۵۰۰ است. نسبت انتخاب شده برای ضخامت مخزن، مقدار مرسوم در طرح اقتصادی مخازن دانه‌ای است [28-29]. پای مخزن مفصلی در نظر گرفته شده است. به منظور جلوگیری از جابه‌جایی‌های قسمت فوقانی سازه تحت بارگذاری عرضی، سقفی صاف با ضخامت ۵ برابر جداره مدل شده است [16]. جداره و سقف هر دو از فولاد S235 با مدول الاستیسیته 2×10^5 مگاپاسکال و نسبت پواسون 0.3 است. رفتار الاستوپلاستیک بدون سخت‌شوندگی با مقاومت جاری شدن ۲۳۵ مگاپاسکال برای فولاد در نظر گرفته شده است. با توجه به تقارن مسئله تنها نیمی از سازه مدل شده است. همچنین در بخش ۶ و تحت عنوان پیوست، درستی مدل‌سازی المان محدود مقاله بررسی شده است.

۳- یافته‌ها و تفسیر نتایج

۳-۱- مُدهای کمانشی و نتایج تحلیل خطی بایفرکیشن

مطابق با سه بارگذاری معرفی شده روی سازه، در ابتدا تحلیل کمانشی بایفرکیشن انجام گرفت. با توجه به اهمیت و تأثیر اندازه مش‌های محاسباتی بر دقت پاسخ‌های حاصل از محاسبات کمانش، مطالعه همگرایی پاسخ‌ها پیش از هر کار صورت پذیرفت. در این راستا، اندازه مش‌ها تا جایی کاهش یافت که میزان تغییر در مقدار بار کمانشی مُد اصلی، کمتر از ۱٪ بهبود یابد. جزئیات این بررسی در جدول (۲) خلاصه شده است. مقدار عددی و مُدهای کمانشی حاصل از این تحلیل به عنوان مبنای مقایسه در طول مقاله است. در اعمال نقص هندسی در قسمت‌های بعدی، طبق پیشنهاد آیین‌نامه اروپا [9]، شکل‌های مُدی حاصل از این تحلیل بکار گرفته شده است. در همان آیین‌نامه و در بررسی اثر نقص هندسی، شکل مُد اول کمانش توصیه شده است؛ اما با توجه به لزوم اعمال نامناسب‌ترین شکل نقص هندسی معادل، مُد مرسوم دیگر [16-30] که به صورت بیرون‌زدگی موضعی در پای مخزن است نیز در بررسی‌ها لحاظ شده است. شکل مُد اول که به صورت چین‌خوردگی موضعی ناشی از برش است، در

دو مُد (الف و ب) به طور جداگانه اعمال شده است که نتایج این موارد در کنار نام تحلیل‌های متناظر در جدول (۴) نیز مشخص است. میزان دامنه نقص هندسی و توضیحات تکمیلی در این حیطه در قسمت بعد ارائه می‌شود.

شکل ۳. نمودار اصلاح شده ساتول در حالت ۱ الی ۳.

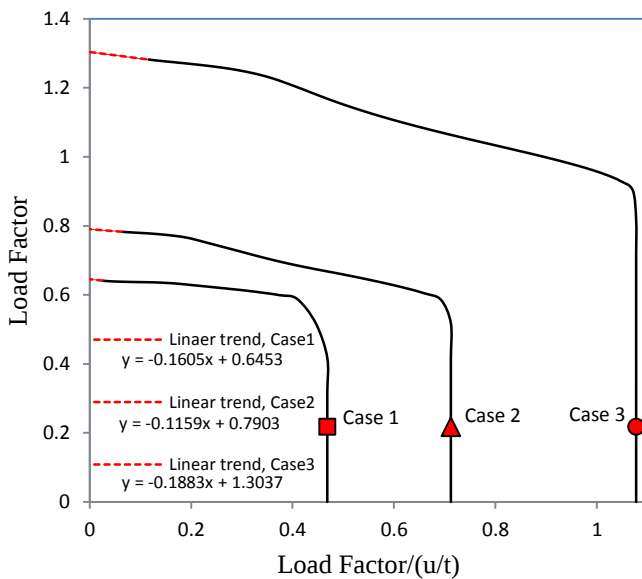


Fig. 3. Modified Southwell plot in case1-3.

جدول ۴. خلاصه مقادیر ضریب بار در لحظه کمانش پوسته استوانه‌ای.

Load pattern	LBA	MNA	GNA	GMNA	GMNA, mode (a)	GMNA, mode (b)	GMNA, mode (a)	GMNA, mode (b)
CASE1	1	0.645	1.442	0.511	0.636	0.814	0.383	0.419
CASE2	1	0.790	1.320	0.585	1.007	0.949	0.469	0.439
CASE3	1	1.304	1.006	0.917	1.033	0.888	0.686	0.630

Table 4. Summary of load factors at the buckling of cylindrical shell.

مقدار بار کمانش پلاستیک مخزن با ترسیم نمودار اصلاح شده ساتول^۳ [33] محاسبه شده است (شکل ۳). بر این اساس با توجه به طولانی شدن زمان تحلیل کامپیوتری مورد نیاز برای همگرایی مقدار بار کمانش پلاستیک، استفاده از نمودار اصلاح شده ساتول، پیشنهاد شده است. مقدار بار کمانشی در

شکل ۲. شکل مُدهای کمانش خطی. ردیف بالا شکل مُد (الف)، ردیف پایین شکل مُد (ب). از چپ به راست در هر ردیف حالت بارگذاری ۱ الی ۳ را نشان می‌دهد.

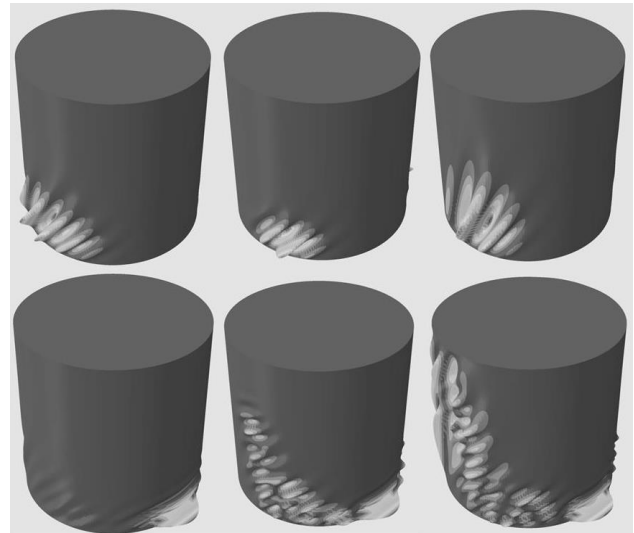


Fig. 2. Linear buckling mode shapes. The upper and the lower rows represent mode (a) and mode (b), respectively. From left to right, the figures at each row show the loading patterns of case1 to 3.

هرچند شمای کلی شکل‌های مُد اصلی طبق ردیف بالایی در شکل (۲) تقریباً یکسان است؛ اما، چین‌خوردگی ناشی از مُد (الف) در حالت ۱ گسترش پیرامونی بیشتری نسبت به ۲ حالت دیگر دارد. در حالت ۳ نیز گسترش ارتفاعی چین-خوردگی بزرگتر است. به طور مشابه، در مورد شکل مُد کمانشی (ب) نیز شمای کلی تقریباً یکسانی در ۳ حالت بارگذاری بدست می‌آید. با این تفاوت که در حالت ۲ و ۳، شاهد گسترش مورب برخی اعوجاج‌ها از پایین مخزن روبه بالای آن هستیم (مطابق ۲ تصویر سمت راست، در ردیف پایین شکل ۲).

۳-۲- نتایج تحلیل‌های پلاستیک و غیرخطی کمانشی

در انجام تمامی تحلیل‌های این قسمت از الگوریتم ریکس^۱ [26] و با محدود کردن بیشینه گام محاسباتی به ۰/۱ استفاده شده است [31,32]. مقادیر ضریب بار^۲ در هر تحلیل نسبت به بار کمانشی تحلیل بایفرکیشن، نرمال شده است. نتایج کامل در جدول (۴) خلاصه شده است. در اعمال نقص هندسی، هر

1 Riks

2 Load Factor (λ)

عنوان نقص هندسی در هر دو تحلیل GMNIA و GNIA مورد نظر است. در تعیین بار کمانشی در موردی شبیه به آنچه در نمودار GNIA در حالت ۲ (شکل ۵) رخ می‌دهد، نقطه عطف ملاک است [35].

شکل ۴. نمودارهای ضریب بار-جابجایی در حالت ۱.

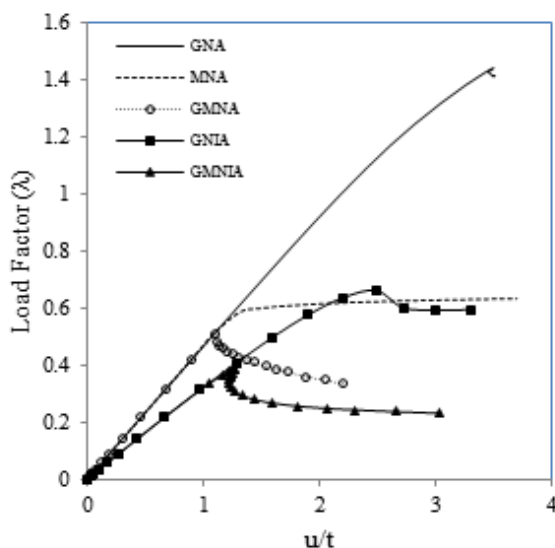


Fig. 4. Load Factor-Displacement curves in case1.

شکل ۵. نمودارهای ضریب بار-جابجایی در حالت ۲.

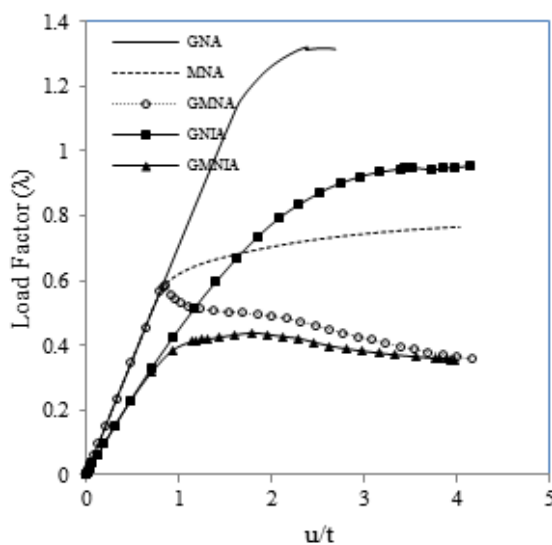


Fig. 5. Load Factor-Displacement curves in case2.

این مورد از برون‌یابی خطی شاخه افقی نمودار بدست می‌آید. با مقایسه نتایج تحلیل‌های انجام گرفته و بر اساس مقادیر جدول (۴) موارد زیر قابل ارزیابی است:

۱- مقدار بارکمانشی پلاستیک از حالت ۱ به حالت ۳، رو به افزایش است. این مشاهده را می‌توان به کاهش تنش‌های غشایی فشاری محوری در پای مخزن، در حرکت از حالت ۱ به ۳ مرتبط دانست. با توجه به چگونگی تغییر بارگذاری از حالت ۱ به ۳، مخزن در واقع با کاهش فشار داخلی (فشار یکنواخت پیرامونی نماینده فشار ایستای مواد دانه‌ای قلمداد شد) همراه است که با مطالعه روتر [34] کاملاً سازگار است.

۲- در مقایسه بار کمانشی تحلیل خطی توأم با تغییرشکل‌های بزرگ (GNA) در مقایسه با تحلیل خطی بایفرکیشن (LBA)، با توجه به فشار روبه خارج، مقدار بار کمانشی بزرگتری حاصل می‌شود. به این طریق، مشاهده انجام شده توسط سادوسکی و روتر [16] تأیید می‌شود.

۳- تغییر بار کمانشی از تحلیل GNA به GMNA آثار پلاستیسیته را نشان می‌دهد. روندی مشابه با بند شماره ۱ (در بالا)، در مورد اثر پلاستیسیته دوباره دیده می‌شود.

۴- آثار نقص هندسی، کاملاً به شکل نقص اولیه وابسته است. مطلب قابل ملاحظه دیگر افزایش مقاومت ایجاد شده در تحلیل GNIA بوسیله مُد (الف) در حالت ۳ است. بنابراین انتخاب شکل مناسب نقص هندسی، بار دیگر مورد تأکید قرار می‌گیرد. تعیین اثر نقص هندسی در باربری پوسته‌ها و کمانش تحت رخداد پلاستیسیته موضعی، همچنان از مهمترین موانع روش‌های نوین طرح این سازه‌ها به حساب می‌آید [25].

شکل‌های (۴ الی ۶) نمودارهای ضریب بار در مقابل جابه‌جایی شعاعی نقطه‌ی کنترلی را نشان می‌دهد. این نقطه روی لبه بالایی و در محل صفحه تقارن مدل انتخاب شده است (در زاویه $\theta=0^\circ$). در ارائه‌ی نمودارهای مربوط به تحلیل‌های شامل اثر نقص هندسی، نمودار متناظر با مُدی که کمترین ضریب بار را ایجاد می‌کند، ترسیم شده است. به این ترتیب و به عنوان نمونه در حالت ۱، انتخاب مُد (الف) به

شکل ۶. نمودارهای ضریب بار-جابجایی در حالت ۳.

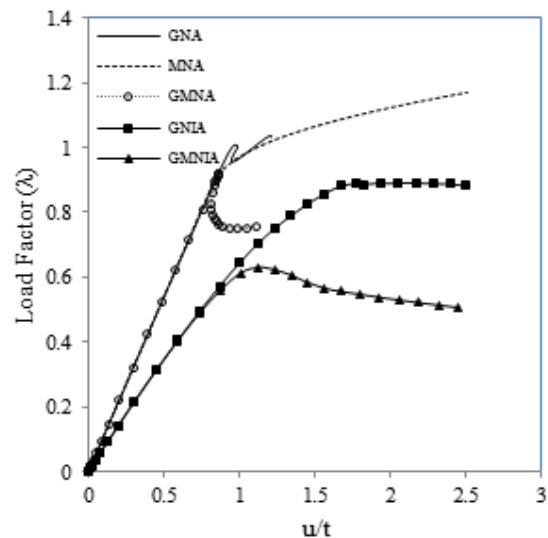


Fig. 6. Load Factor-Displacement curves in case3.

همچنین شکل (۷) به ترتیب از ردیف بالا به پایین، شکل کمانش یافته مخزن را در لحظه بحرانی کمانش، برای تحلیل-های GNA، GMNA، GNIA و GMNIA نشان می‌دهد. در واقع این شکل، نتایج نمودارهای شکل (۴ الی ۶) را به صورت تغییر شکل بوجود آمده در مخزن، نمایش می‌دهد.

در بررسی بیشتر تحلیل GMNIA، به عنوان کاملترین نوع تحلیل، همان‌گونه که در شکل (۷) نیز مشاهده می‌شود، متناسب با نوع نقص هندسی انتخاب شده، شکل کمانشی سازه متأثر خواهد شد. در حالت ۱، گسترش چین‌خوردگی مورب در قسمت پایین مخزن به همراه ترکیب ضعیف با مُد کمانش پای فیلی [34] دیده می‌شود. در حالت ۲ و ۳، اثر مُد کمانشی پای فیلی قوی‌تر شده و از چین‌خوردگی مورب در پایین و پیرامون مخزن کاسته می‌شود. به علاوه گسترش برخی اعوجاج‌ها و تورفتگی، در قسمت میانه و بالای مخزن در حالت ۲ و ۳ به چشم می‌آید. در مقایسه با شکل کمانش GNA، مورد اخیر را می‌توان به آثار غیرخطی هندسی وابسته دانست. در تبیین شکل مُد پای فیلی که در بالا به آن اشاره شد، نتایج تحلیل GNA و GMNA در شکل (۷) برای حالت ۱، این مُد را به خوبی نشان می‌دهد.

شکل ۷. شکل مُد کمانشی در بار بحرانی، از ردیف بالا به پایین به ترتیب: GNA، GMNA، GNIA و GMNIA. از چپ به راست، به ترتیب حالت ۱ الی ۳. ضریب مقیاس شکل‌های هر ردیف از بالا به ترتیب: ۱۰، ۱۰۰، ۲۰ و ۲۰ است.

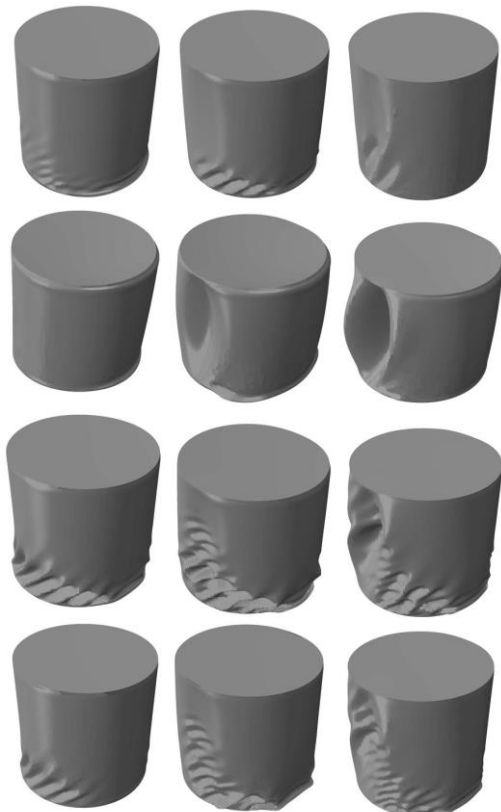


Fig. 7. Incremental buckling modes at critical load; From top to bottom row: GNA, GMNA, GNIA and GMNIA, respectively. From left to right, case1 to 3, respectively. Geometric scale factors are 10, 100, 20 and 20, from top to bottom row, respectively.

۳-۳- بررسی حساسیت کمانشی به نقص هندسی

در ساخت هر سازه، با توجه به شرایط ساخت کارخانه، چگونگی اجرا و نصب سازه و موارد مشابه دیگر، همواره مقداری اعوجاج از هندسه تئوری و بدون نقص وجود دارد. به منظور حساسیت‌سنجی مقاومت سازه به نقص هندسی، اطلاع از دامنه و شکل نقص، هر دو حائز اهمیت است. اما در واقعیت تعیین این موارد پیش از ساخت و اتمام کار، عملاً امکان‌پذیر نیست. از طرفی شکل نقصی که بر مقاومت پوسته-های استوانه‌ای زیان‌بار است، متناسب با نوع الگوی بار تغییر می‌نماید. پس در طرح عملی، با توجه به وجود چندین ترکیب بار بر سازه، لازم است چندین فرم و دامنه نقص در نظر گرفته شود [36]. در آیین‌نامه اروپا [9] سه کلاس

شکل ۸. نمودار حساسیت به نقص در حالت ۱ به ازای دو فرم نقص هندسی.

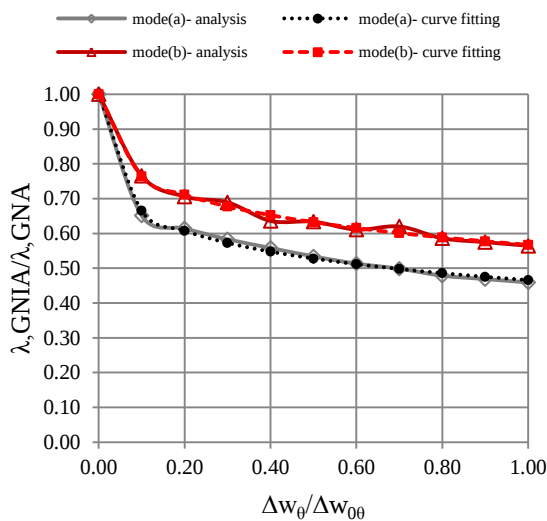


Fig. 8. Imperfection sensitivity curves for case1 due to 2 different imperfection forms.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله رفتار پیچیده کمانشی مخازن جداره نازک کوتاه قامت، تحت ۳ الگوی توزیع فشار عرضی بررسی شد. این سه توزیع فشار در نظر دارد، فشار لرزه‌ای ناشی از محتویات دانه-ای بر دیواره سازه را نمایندگی کند. وضعیت کمانشی در هر حالت به تفکیک مورد ارزیابی قرار گرفت. از نمودارهای اصلاح شده ساتول در تخمین مقاومت کمانشی پلاستیک پوسته‌های استوانه‌ای استفاده گردید. با ارائه نمودارهای ضریب بار- جابه‌جایی به‌ازای تحلیل‌های مختلف غیرخطی انجام گرفته، رفتار کمانشی مخازن کوتاه قامت مقایسه شد. برای سازه‌ای یکسان و تحت برآیند بار مساوی، مشاهده شد که آثار پلاستیسیته و نقص هندسی بسته به نوع بارگذاری می‌تواند کاملاً متفاوت باشد. آثار نقص هندسی با انتخاب ۲ شکل متفاوت از مدهای کمانشی خطی مورد ارزیابی قرار گرفت. ترکیب مد کمانشی پای فیل و چین‌خوردگی مورب برشی در پای مخزن، به‌عنوان مد محتمل خرابی طی بارگذاری‌های انجام شده، معرفی شد. کاهش مقاومت به دست آمده در مخزن مورد مطالعه، تا بیش از ۵۰ درصد نیز مشاهده شد. در انتها با ارائه روابطی ساده، به معرفی چگونگی

ساخت عالی، خوب و متوسط تعریف شده است. بر این اساس میزان دامنه نقص هندسی متناسب با هر کلاس تعیین می‌شود. در مطالعه حاضر شکل مدهای کمانشی تحلیل LBA به عنوان فرم نقص در نظر گرفته شده است. به کمک روابط موجود در آیین‌نامه مذکور و با توجه به فرم نقص انتخاب-شده، دامنه گودی^۱ جداره مخزن از روابط (۱ الی ۳) تعیین می‌شود:

$$U_{0\theta} = \Delta w_{0\theta} / l_{g\theta} \quad (1)$$

$$l_{g\theta} = 2.3(l/r)^{1/2}(t/r)^{1/4}r, \text{ but } l_{g\theta} \leq r \quad (2)$$

$$U_{0\theta} \leq U_{0,max} \quad \text{Class C: } U_{0,max} = 0.016 \quad (3)$$

همان‌گونه که در رابطه ۳ مشخص است، در مطالعه حاضر، کلاس ساخت متوسط (کلاس C) در نظر گرفته شده است. به منظور ارائه نمونه از چگونگی تأثیر نقص هندسی بر مقاومت کمانشی مخزن، برای حالت ۱ و با اعمال دو مد (الف) و (ب) بر سازه بدون نقص، نتیجه به صورت شکل (۸) بدست آمده است. این امکان وجود دارد که براساس نوع بارگذاری و مشخصات مخزن، شبیه به آنچه آیین‌نامه اروپا [9] در کمانش تحت فشار محوری ارائه می‌دهد، ضریب کاهش مقاومت الاستیک ناشی از نقص را معرفی نمود. این امر کمک می‌کند که در موارد مشابه به لحاظ بارگذاری و مشخصات سازه، با توجه به کلاس ساخت آن، کاهش مقاومت هندسی را بتوان تخمین زد. رابطه (۴) به معرفی فرم کلی قابل ارائه در این زمینه می‌پردازد [12]. پارامترهای مجهول a و b از برازش منحنی قابل محاسبه است. در صورت انجام این کار برای نمودارهای شکل (۸)، برای مد (الف) و (ب) به ترتیب رابطه‌های (۵ و ۶) نتیجه می‌شود:

$$\alpha_{imp} = \frac{\lambda_{GNIA}}{\lambda_{GNA}} = \frac{1}{1 + a(\Delta w / \Delta w_0)^b} \quad (4)$$

$$\alpha_{imp, mode (a)} = \frac{1}{1 + 1.146(\Delta w_{\theta} / \Delta w_{0\theta})^{0.357}} \quad (5)$$

$$\alpha_{imp, mode (b)} = \frac{1}{1 + 0.763(\Delta w_{\theta} / \Delta w_{0\theta})^{0.392}} \quad (6)$$

باد)، تحت تحلیل‌های مختلف می‌پردازد که در ادامه با مقادیر بدست آمده توسط پژوهش حاضر مقایسه می‌شود (جدول ۳).
 جدول ۵. مقایسه نتایج تحلیل‌های چن و روتر [12] با پژوهش حاضر.

Type of analysis	q_w [N/m ²]- Chen & Rotter [12]	q_w [N/m ²]- Present study	Error%
LBA	20443	20233	≈ 1
GNA	20238	20041	≈ 1
GMNA	20238	20041	≈ 1

Table 5. Comparison of Chen & Rotter [12] results with those of present study.

به منظور بررسی درستی تحلیل‌های غیرخطی GMNIA، شکل (۹) به مقایسه این موضوع می‌پردازد. نقص اولیه در مقاله چن و روتر [12]، مشابه پژوهش فعلی، هماهنگ با ضوابط آیین‌نامه اروپا [9] و بر اساس مُد اول کمانش سازه اعمال شده است. مقایسه نتایج حاصل، تطابق فوق‌العاده مناسبی را نشان می‌دهند.

شکل ۹. نمودارهای بار-جابجایی مخازن استوانه‌ای کوتاه قد با نقص هندسی به شکل مُد کمانشی خطی، مطالعه حاضر در قیاس با مقاله چن و روتر [۱۲].

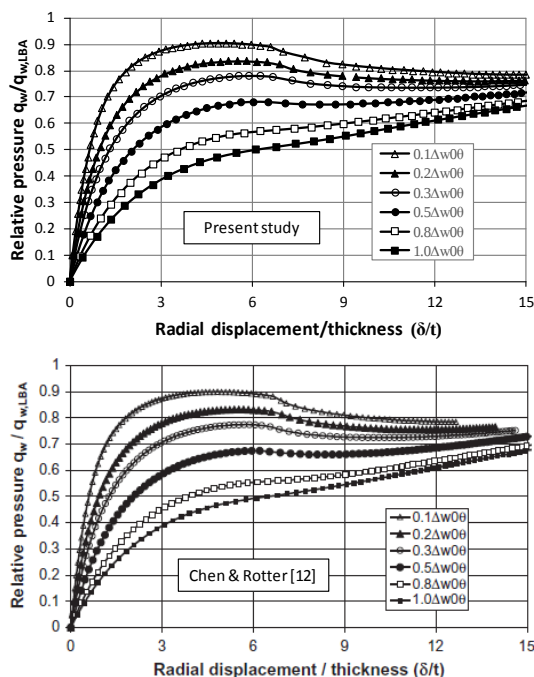


Fig. 9. Load-Displacement curves for stocky cylinders with a linear eigenmode imperfection, Present study vs. Chen & Rotter [12].

در نظریه‌ی آثار نقص هندسی در کاهش مقاومت کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای، مشابه آیین‌نامه اروپا [9] و برای بارگذاری دلخواه، پرداخته شد.

۵- علائم و نمادها

U_{00} : پارامتر گودی

$U_{0,max}$: تلورانس پارامتر گودی بر اساس کلاس ساخت

$\Delta w_{0\theta}$: دامنه گودی (عمود بر سطح جداره)

$l_{g\theta}$: معیار طول

l : ارتفاع مخزن

r : شعاع مخزن

t : ضخامت مخزن

α_{imp} : ضریب کاهش مقاومت الاستیک ناشی از نقص

λ : ضریب بار

۶- پیوست

به منظور صحت‌سنجی روش تحلیل خطی و غیرخطی انجام گرفته در مقاله حاضر، نتایج مقاله چن و روتر [۱۲] در کمانش پوسته‌های استوانه تحت بار باد، مورد مقایسه قرار می‌گیرد. علت انتخاب این مقاله، ۱- شباهت در نوع بارگذاری، ۲- شباهت در نسبت لاغری و یکسانی نسبت ضخامت جداره و ۳- یکسان بودن نوع تحلیل‌های انجام گرفته در آن، با پژوهش حاضر است.

مشخصات نمونه مخزن فولادی مورد مقایسه عبارت است از: نسبت ارتفاع به شعاع برابر با ۳ (مخزن کوتاه قد)، نسبت شعاع به ضخامت برابر با ۵۰۰، مدول الاستیسیته 2×10^5 مگاپاسکال و نسبت پواسون $0/3$ و رفتار الاستوپلاستیک بدون سخت‌شوندگی با مقاومت جاری شدن ۲۵۰ مگاپاسکال برای فولاد آن. پای مخزن نیز مفصلی مدل شده است.

بارگذاری فشار باد (P) که در ارتفاع مخزن ثابت است از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$P(\theta) = C_p(\theta) \cdot q_w \quad (7)$$

$$C_p(\theta) = -0.4333 + 0.3067 \cdot \cos(\theta) + 0.9067 \cdot \cos(2\theta) + 0.3267 \cdot \cos(3\theta) - 0.1067 \cdot \cos(4\theta) \quad (8)$$

زاویه θ مطابق شکل (۱) و به درجه اندازه‌گیری می‌شود. مقاله چن و روتر [12] به ارائه مقدار بحرانی q_w (فشار ایستای

۷- مراجع

References

- [19] Maekawa A. & Fujita K. 2009 Dynamic buckling analysis of cylindrical water storage tanks: a new simulation method considering coupled vibration between fluid and structure. In *ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference*, American Society of Mechanical Engineers, p. 77–86.
- [20] Hamdan F. H. 2000 Seismic behaviour of cylindrical steel liquid storage tanks. *Journal of Constructional Steel Research* 53:307–33.
- [21] Rosin J., Hennebühl B. & Butenweg C. 2014 Global buckling analysis of cylindrical liquid storage tanks under earthquake loading.
- [22] Greiner R. & Kettler M. 2008 Seismic response of tanks in view of shell theory. *Structures and Granular Solids: From Scientific Principles to Engineering Application* 159-168.
- [23] Kuczyńska N., Wójcik M. & Tejchman J. 2015 Effect of bulk solid on strength of cylindrical corrugated silos during filling. *Journal of Constructional Steel Research* 115:1–17.
- [24] EN 1998-4. 2006 Design of structures for earthquake resistance – Part 4: Silos, tanks and pipelines. Brussels: CEN.
- [25] Rotter J. M. 2011 Shell buckling design and assessment and the LBA-MNA methodology. *Stahlbau* 80:791–803.
- [26] Dassault Systèmes Simulia. 2012 Abaqus CAE User's Manual.
- [27] Bandyopadhyay J. N. & Aditya A. K. 1989 Bending analysis of doubly curved shell structures by finite element method. *Computers & Structures* 31:717–28.
- [28] Song C. Y. 2004 Effects of patch loads on structural behavior of circular flat-bottomed steel silos. *Thin-Walled Structures* 42:1519–42.
- [29] Gillie M. & Rotter J. M. 2002 The effects of patch loads on thin-walled steel silos. *Thin-Walled Structures* 40:835–52.
- [30] Sadowski A. J. & Rotter J. M. 2009 Study of buckling in steel silos under eccentric discharge flows of stored solids. *Journal of Engineering Mechanics* 136:769–76.
- [31] Song C. Y., Teng J. G. & Rotter J. M. 2004 Imperfection sensitivity of thin elastic cylindrical shells subject to partial axial compression. *International Journal of Solids and Structures* 41:7155–80.
- [32] Teng J. G. & Song C. Y. 2001 Numerical models for nonlinear analysis of elastic shells with eigenmode-affine imperfections. *International Journal of Solids and Structures* 38:3263–80.
- [33] Doerich C. & Rotter J. M. 2011 Accurate determination of plastic collapse loads from finite element analyses. *Journal of Pressure Vessel Technology* 133:11202.
- [34] Rotter J. M. 2006 Elephant's foot buckling in pressurised cylindrical shells. *Stahlbau* 75:742–7.
- [35] Yamaki N. 1984 *Elastic Stability of Circular Cylindrical Shells*. vol. 27. Elsevier.
- [36] Teng J. G. & Rotter J. M. 2004 Buckling of thin shells. *Buckling of Thin Metal Shells* 1–41.
- [1] Rotter J. M. 2016 The new method of reference resistance design for shell structures. In *Proc. SDSS 2016, Int. Colloq. On Stability & Ductility of Steel Structures, Timisoara, Romania*.
- [2] Rotter J. M. 2016 Advances in understanding shell buckling phenomena and their characterisation for practical design. In *Recent Progress in Steel and Composite Structures: Proceedings of the XIII International Conference on Metal Structures (ICMS2016, Zielona Góra, Poland, 15-17 June 2016)*, vol. 2007, CRC Press, p. 3.
- [3] Winterstetter T. A. & Schmidt H. 2002 Stability of circular cylindrical steel shells under combined loading. *Thin-Walled Structures* 40:893–910.
- [4] Lundquist E. E. 1935 Strength tests of thin-walled duralumin cylinders in combined transverse shear and bending.
- [5] Michel G., Jullien J. F & Rotter J. M. 2004 Cylindrical shells under global shear loading. *Buckling of Thin Metal Shells* 230-260.
- [6] Galletly G. D. & Blachut J. 1985 Plastic buckling of short vertical cylindrical shells subjected to horizontal edge shear loads. *Journal of Pressure Vessel Technology* 107:101–6.
- [7] Kokubo K., Nagashima H. & Takayanagi M. & Mochizuki A. 1993 Analysis of shear buckling of cylindrical shells. *JSME International Journal. Ser. A, Mechanics and Material Engineering* 36:259–66.
- [8] Michel G., Limam A. & Jullien J. F. 2000 Buckling of cylindrical shells under static and dynamic shear loading. *Engineering Structures* 22:535–43.
- [9] EN 1993-1-6. 2007 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-6: Strength and stability of shell structures. Brussels: CEN.
- [10] Gettel M. & Schneider W. 2007 Buckling strength verification of cantilevered cylindrical shells subjected to transverse load using Eurocode 3. *Journal of Constructional Steel Research* 63:1467–78.
- [11] Ansourian P. 1992 On the buckling analysis and design of silos and tanks. *Journal of Constructional Steel Research* 23:273–94.
- [12] Chen L. & Rotter J. M. 2012 Buckling of anchored cylindrical shells of uniform thickness under wind load. *Engineering Structures* 41:199–208.
- [13] EN 1993-4-1. 2007 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 4-1: Silos. Brussels: CEN.
- [14] Zhao Y., Cao Q. & Su L. 2013 Buckling design of large circular steel silos subject to wind pressure. *Thin-Walled Structures* 73:337–49.
- [15] EN 1991-4. 2006 Eurocode 1: Actions on structures - Part 4: Silos and tanks. Brussels: CEN.
- [16] Sadowski A. J. & Rotter J. M. 2012 Slender thin cylindrical shells under unsymmetrical strip loads. *Thin-Walled Structures* 61:169–79.
- [17] Fajuyitan O. K., Sadowski A. J. & Wadee M. A. 2017 Buckling of very short elastic cylinders with weld imperfections under uniform bending. *Steel Construction* 10:216–21.
- [18] Virella J. C., Godoy L. A. & Suárez L. E. 2006 Dynamic buckling of anchored steel tanks subjected to horizontal earthquake excitation. *Journal of Constructional Steel Research* 62:521–31.

Buckling of short cylindrical steel shells under transverse loading

Shervin Maleki^{1*}, Alireza Moazezi Mehretehran²

1- Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology

2- Ph.D. candidate, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology

*smaleki@sharif.edu

Abstract:

Thin-walled cylindrical shells are extensively used in civil engineering. Due to thin wall thickness, they are vulnerable to stability failure in the form of shell buckling. The European Standard in design of steel structures is considered to be a pioneer in strength and stability assessment of shell structures. Wind pressure and seismic action lead to non-uniform distributed transverse loading on cylindrical shells. It has been shown that non-uniform loading may have a significant and deleterious effect on the structural stability of these structures. The present study deals with buckling behavior of short cylindrical shells under three non-uniform distributed transverse pressures. The loading patterns were adopted in a way to simulate the normal pressures due to ensiled materials in excited situation. It was done with respect to Eurocode design provisions for earthquake resistance of circular silos. Its aim is to produce useful information for the design of cylindrical shells against buckling under general transverse loading. An overview of Eurocode treatments of shell stability using finite element analysis is presented. In addition, the paper explores the effects of different forms of transverse loading on stability response of the structure. The numerical approach was selected to fulfill the stability evaluations. Eurocode has many provisions for the global analysis of shell structures using finite element analysis. Hence, a full suite of computational shell buckling calculations was performed according to this standard. Linear bifurcation analysis was undertaken, firstly. It served as a benchmark for further evaluations. Two different linear bifurcation eigenmodes were observed. The main mode of buckling was diagonal shear wrinkles near the base of silo with partial extension in circumferential direction. The other mode was local axial compression buckle at the foot of the shell. A wide range of imperfection sensitivity studies using these eigenmodes were conducted. The imperfections can take many forms and can have different amplitudes. Some imperfection forms may result in higher strength of the shell. This makes identifying the worst condition very challenging. A sample parametric study on imperfection amplitude in forms of eigenmodes, illustrated this kind of analysis. Additionally, the effect of plasticity was explored through the ideal elastic-plastic model for steel. It was shown that due to loading pattern, the plasticity may cause different amount of reduction in elastic load factor. To establish the actual plastic collapse load, the modified Southwell plots were used. To achieve more realistic evaluation of buckling and post-buckling behavior of thin-walled cylinders, the finite element analyses should include all possible source of strength reduction in stability of the shell structures. To this end the geometrically and materially non-linear analysis with explicit inclusion of imperfections (GMNIA) is considered to be the most advanced form of numerical analysis. The load factors derived from GMNIA analyses showed a stability reduction more than half as compared to linear bifurcation analyses in two load cases. The non-linear incremental buckling modes were also explored. Finally, the general shape of buckled short cylinders under transverse loading was characterized by combination of diagonal shear wrinkles and elephant's foot buckling mode.

Keywords: Short cylindrical shells, Buckling, Transverse loading, Eurocode, Finite element method, Imperfections