

ارزیابی کمانشی نمونه سیلوهای استوانه‌ای ورق صاف فولادی دارای فرورفتگی در محل درز جوش پیرامونی تحت بار تخلیه

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

۱- پژوهشگر پسادکتری دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

*a.moazezi@sharif.edu

تاریخ دریافت: [۱۳۹۸/۱۱/۱۳]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۹/۰۹/۰۳]

چکیده

سیلوهای استوانه‌ای به عنوان مهم‌ترین سازه در ذخیره و نگهداری مواد دانه‌ای شناخته می‌شوند. با توجه به کارکرد این سازه‌ها، بارهای ناشی از فرآیند بارگیری و تخلیه محتویات، اصلی‌ترین بارگذاری در طرح سیلوها بشمار می‌آیند. از طرفی، معمولاً فشار بزرگ‌تری هنگام مرحله تخلیه در قیاس با مرحله بارگیری بر جداره سازه وارد می‌شود؛ از این رو، اساس طرح سیلوها بر پایه فشارهای تخلیه است. بنابر ضخامت اندک جداره، کنترل سیلوهای فولادی در برابر خرابی کمانشی حائز اهمیت است. فشار نرمال محتویات و ویژگی اصطکاکی دانه‌ها، جداره سازه را تحت فشار محوری و کشش پیرامونی قرار می‌دهد. بدین ترتیب تحت بارگذاری تخلیه، تحلیل کمانشی سیلوها تحت فشار محوری همراه با فشار داخلی مطرح است. در سیلوهایی که باریکه‌های سازنده جداره از طریق جوشکاری در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند، فرورفتگی موضعی در محل درز جوش به عنوان یکی از اشکال شناخته شده نقص هندسی به حساب می‌آید. وجود نقص هندسی می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه در ظرفیت کمانشی سازه شود. آیین‌نامه اروپا به عنوان پیشرفته‌ترین آیین‌نامه در زمینه طرح سیلوهای فولادی، روشی دستی برای طرح کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای تحت فشار محوری همزمان با فشار داخلی ارائه می‌نماید. در این مطالعه، با استفاده از تحلیل‌های المان محدود، ضمن در نظرگیری اثر نقص هندسی در محل درز جوش به عنوان پارامتر اصلی مورد بررسی، روش طرح آیین‌نامه ارزیابی می‌شود. بدین ترتیب ابتدا به کمک تحلیل‌های خطی و غیرخطی المان محدود، رفتار کمانشی و پس-کمانشی نمونه سیلوهای مفروض به دقت تبیین می‌شود؛ و در گام بعد، روش تحلیل دستی آیین‌نامه در مقابل نتایج تحلیل‌های کامپیوتری مورد مقایسه قرار می‌گیرد. بر این اساس و در محدوده مطالعه انجام شده، روش طرح دستی آیین‌نامه تنها حدود ۱۳ تا ۳۲ درصد، ظرفیت کمانشی را در جهت ایمنی، کمتر از روش کامپیوتری تخمین می‌زند، بنابراین عملکردی رضایت‌بخش دارد.

واژگان کلیدی: سیلوهای استوانه‌ای فولادی، نقص هندسی، کمانش، آیین‌نامه اروپا، فشار تخلیه

۱- مقدمه

به صورت جوشی و یا پیچی ساخته شود. با این تفاوت که باریکه‌های^۱ سازنده جداره سیلو در نوع جوشی، به وسیله

سیلوهای فولادی به دو شکل عمده سیلوهای ورق صاف و ورق موجدار دیده می‌شوند. نوع ورق صاف، خود می‌تواند

1 Strakes

جوش و در نوع پیچی، بوسیله پیچ در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. همچنین به دلیل افزایش پیوسته تنش ناشی از محتویات در حرکت از بالا به پای سازه، سیلوهای فولادی اغلب به صورت جداره متغیر در ارتفاع ساخته می‌شوند.

در سیلوهای ورق صاف جوشی، در محل اتصال ورق‌های فولادی نورد شده برای ساخت جداره سازه، عملیات نورد ورق‌ها و نیز جمع‌شدگی^۲ ناشی از سرد شدن جوش‌های پیرامونی، منجر به ایجاد یک فرورفتگی^۳ در محل درز جوش می‌شود [1]. این مورد به صورت یک نقص هندسی^۴ تقریباً یکنواخت در پیرامون جداره، در ساخت سیلوهای جوشی شناخته شده است [2]. وجود نقص هندسی می‌تواند ظرفیت کمانشی سازه را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. این درحالی است که با توجه به جداره نازک بودن سیلوها، طرح کمانشی در این سازه‌ها حائز اهمیت است. بدین ترتیب، جداره متغیر بودن سازه و وجود درز جوش، چندین محل در ارتفاع سازه، به ویژه در محل تغییر ضخامت باریک‌ها را مستعد خرابی کمانشی می‌نماید.

اگرچه لازم است چند نوع بار مختلف همچون بار باد [3,4]، بار لرزه‌ای [5] و بارهای ناشی از بارگیری و تخلیه [6-9]، در طرح سیلوها در نظر گرفته شود؛ پُر تکرارین باری که سیلوها در طول عمر خود تجربه می‌کنند، مربوط به فشار بارگیری و تخلیه محتویات است. همچنین با توجه به فشار بزرگ‌تر وارد بر جداره سازه تحت مرحله تخلیه [10]، فشارهای متناظر این مرحله ملاک طرح سیلوها است.

محتویات دانه‌ای باعث ایجاد فشار نرمال و ترکشن اصطکاکی^۵ بر دیواره سیلوها می‌شوند. از این رو، بارگذاری تخلیه شامل دو مؤلفه اصلی فشار محوری و فشار داخلی بر جداره سازه است [10]. آیین‌نامه اروپا [11, 12] در روش طرح دستی یا طرح تنشی^۶ خود، راهی برای تخمین مقاومت کمانشی سیلوها و پوسته‌های استوانه‌ای تحت فشار محوری همراه با فشار داخلی ارائه می‌نماید. در این روش، برای تعیین

ظرفیت کمانشی محوری سیلوها، لازم است حداکثر بار ضریب‌دار محوری (ناشی از ترکشن اصطکاکی ایجاد شده از اصطکاک بین جداره و محتویات طی فرآیند تخلیه) بر سازه اعمال شود؛ در این میان، فشار داخلی ناشی از فرآیند بارگیری، بدون اعمال ضریب‌بار در محاسبات دخیل می‌شود [11-13]. روش آیین‌نامه در طول این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است که توضیحات تکمیلی در این خصوص، در بخش های آتی ارائه می‌شود.

چندین مطالعه در رابطه با ارزیابی کمانشی سیلوها تحت بار تخلیه در گذشته وجود داشته است. سانگ و تنگ [14] به تحلیل کامپیوتری یک نمونه سیلوی لاغر با ضخامت جداره ثابت، تحت بار تخلیه با خروج از مرکزیت^۷ کوچک پرداختند. آن‌ها اضافه فشار پیشنهادی چهار آیین‌نامه آلمان [15]، ایزو [16]، یوروکد [17] و استرالیا [18]، برای پوشش آثار عدم تقارن در توزیع فشار تخلیه را مقایسه کردند. این اضافه فشار که به صورت موضعی و معمولاً در تراز میانی ارتفاع سیلوها باید اعمال شود، اصطلاحاً فشار وصله‌ای یا پچ‌لود^۸ نامیده می‌شود [17]. هنگام این مطالعه، اثر اضافه فشار فوق در نتایج مقاومت کمانشی نمونه سیلوی مورد مطالعه اندک ارزیابی شد.

در مطالعه‌ای دیگر سانگ [19] با انجام تحلیل‌های خطی و غیرخطی روی یک نمونه سیلوی لاغر ورق صاف جداره ثابت، با در نظرگیری چند شکل مختلف برای پچ‌لود، نتیجه گرفت که اثر اضافه فشار موضعی تحت تخلیه با خروج از مرکزیت کوچک را می‌توان با افزایش درصد مشخصی از ترکشن اصطکاکی پوشش داد. آیین‌نامه اروپا [10] نیز در همین راستا اجازه می‌دهد اضافه فشار مذکور یا به صورت موضعی بر سیلو اعمال شود و یا به صورت معادل، با درصدی افزایش در فشار تخلیه مرکزی^۹ در نظر گرفته شود. این دو روش، به تازگی توسط مهرطهران [20] بررسی شده است. براساس این پژوهش و منطبق بر روش آیین‌نامه [10]، افزایش یکنواخت در فشار تخلیه مرکزی نسبت به اعمال

2 Shrinkage

3 Depression

4 Imperfection

5 Frictional traction

6 Stress design

7 Eccentric discharge

8 Patch load

9 Concentric discharge

موضعی اضافه فشار (پچلود)، حدود ۱۰ درصد مقاومت کمانشی کوچکتری را پیش‌بینی می‌نماید.

در دیگر مطالعات در این حیطه، سادوسکی و روتر [7] به تحلیل المان محدود و تعیین مقاومت کمانشی پنج نمونه سیلوی فولادی جداره متغیر، تحت توزیع فشار ناشی از تخلیه مرکزی پرداختند. در این مطالعه رفتار کمانشی و مقاومت سیلوها با در نظرگیری نسبت‌های مختلف ارتفاع به قطر، تشریح شد. آن‌ها همچنین در دو مطالعه دیگر خود [8,9] به بررسی اثر فشار تخلیه با خروج از مرکزیت در مقاومت کمانشی نمونه سیلوهایی لاغر و بسیار لاغر پرداختند. براساس نتایج حاصل، کاهش قابل توجه در مقاومت کمانشی تحت خروج از مرکزیت‌های بزرگ نسبت به تخلیه مرکزی، در این سیلوها مشاهده شد.

در تازه‌ترین مطالعات، کائو و همکاران [21] اثر ترک‌های حین ساخت^{۱۰} بر جداره نمونه سیلوهایی لاغر تحت بار تخلیه آیین‌نامه اروپا [10] را بررسی کردند. آن‌ها آثار نسبت لاغری، طول ترک، جهت‌گیری ترک به صورت قائم و پیرامونی و وجود یک یا چند ترک را، بر مقاومت کمانشی این سیلوها مورد بررسی قرار دادند. همچنین ملکی و مهرطهران [3] مقاومت کمانشی نمونه سیلوهایی ورق صاف جداره متغیر فولادی را تحت بار باد، بار تخلیه و ترکیب بار باد و تخلیه، با روش المان محدود بدست آوردند. آن‌ها در این مطالعه با انجام انواع تحلیل‌های خطی و غیرخطی و در نظرگیری نقص هندسی به شکل مُد اول کمانشی سازه، اثر بار باد به عنوان بار همراه با بار تخلیه را، در مقاومت کمانشی نمونه سیلوهایی مطالعه شده اندک ارزیابی کردند. این نتیجه‌گیری در محدوده متوسط سرعت مبنای طرح باد اروپا ارائه شد.

نظر به پیشینه پژوهش، با وجود چندین مطالعه در تحلیل سیلوهایی فولادی ورق صاف تحت بار تخلیه، هیچ مطالعه‌ای به‌طور مشخص به بررسی قوانین آیین‌نامه اروپا در طرح سیلوهایی استوانه‌ای تحت فشار محوری همزمان با فشار داخلی نپرداخته است. از این‌رو پژوهش حاضر با در نظرگیری سه نمونه سیلوی فولادی جداره متغیر، ضمن تشریح روش

آیین‌نامه در این رابطه، به مقایسه عملکرد روابط آیین‌نامه ذیل روش طرح دستی با نتایج تحلیل المان محدود می‌پردازد. در این میان نقص هندسی موجود در محل اتصال باریک‌های سازنده جداره سیلوها، به‌عنوان پارامتر اصلی در انجام تحلیل‌ها مورد نظر بوده است. براساس مطالب ارائه شده، عمده نوآوری‌های این پژوهش عبارتند از: (الف) تبیین رفتار کمانشی و پس‌کمانشی^{۱۱} نمونه سیلوهایی فولادی با استفاده از تحلیل‌های خطی و غیرخطی، ضمن در نظرگیری نقص هندسی به صورت فرو رفتگی در محل درز جوش پیرامونی، تحت بار تخلیه؛ و (ب) ارزیابی روش آیین‌نامه اروپا در خصوص طرح سیلوهایی استوانه‌ای دارای نقص هندسی تحت فشار محوری همزمان با فشار داخلی، در قیاس با نتایج تحلیل‌های المان محدود کامپیوتری.

۲- مدل‌های عددی و روش تحلیل

۲-۱- سیلوهایی مطالعه شده

در این مطالعه یک سیلوی کوتاه، یک سیلوی میانی و یک سیلوی لاغر مطابق با دسته‌بندی آیین‌نامه اروپا [10] در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب انواع نسبت‌های ابعادی عملی آیین‌نامه (نسبت ارتفاع معادل محتویات دانه‌ای از کف سیلو (h_c) ، به قطر آن (d_c)) پوشش داده شده است. مشخصات هندسی این سازه‌ها در جدول (۱) خلاصه شده است. برای سیلوی لاغر ارتفاع و قطر سیلو به ترتیب ۲۵ متر و ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. ابعاد دو سیلوی میانی و کوتاه نیز به شکلی انتخاب شدند که حجم تقریباً برابری با نمونه سیلوی لاغر داشته باشند. این سیلوها تحت بار تخلیه آیین‌نامه اروپا [10] با فرض محتویات گندم، منطبق بر روش آنالیز کامپیوتری غیرخطی آیین‌نامه اروپا [11]، طراحی و کنترل شده‌اند [3].

جدول ۱. مشخصات هندسی سیلوها.

Aspect ratio range	Silo slenderness category	Height (h_c) [m]	Diameter (d_c) [m]	aspect ratio (h_c/d_c)
$h_c/d_c \geq 2.0$	Slender	25	10	2.5
$1.0 < h_c/d_c < 2.0$	Intermediate slender	18	12	1.5
$h_c/d_c \leq 1.0$	Squat	12	15	0.8

Table 1- Geometric characteristics of steel silos.

جمع‌شدگی ناشی از سرد شدن جوش است [1]. فرورفتگی پیرامونی ایجاد شده در محل اتصال باریکه‌ها که فرم تقریباً یکنواخت دارد، یکی از اشکال شناخته شده نقص هندسی در سیلوهای جوشی به حساب می‌آید. این فرورفتگی در محل درز جوش پیرامونی، آثار زیان‌باری بر مقاومت کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای تحت فشار محوری دارد [1, 2, 22].

روتر و تنگ [1] رابطه (۱) را برای شکل فرورفتگی در محل درز جوش پیشنهاد کرده‌اند:

$$\delta(x) = \delta_0 e^{-\pi x / \lambda} \left(\cos \frac{\pi x}{\lambda} + \xi \sin \frac{\pi x}{\lambda} \right) \quad (1)$$

در رابطه بالا، δ_0 دامنه فرورفتگی، $\lambda = 2.444 \sqrt{rt}$ طول نیم‌موج خمشی محوری خطی^{۱۳} و ξ پارامتر تعیین درجه گردی رأس درز جوش است. t و r نیز شعاع و ضخامت موضعی جداره سازه است. دامنه نقص هندسی تعریف شده طی رابطه فوق، با دور شدن از درز اتصال و افزایش پارامتر x به سرعت زوال می‌یابد (شکل ۲). شکل فرورفتگی درز جوش اگر $\xi = 1$ باشد، نوع a و اگر $\xi = 0$ باشد، نوع b نامیده می‌شود. با توجه به مطالعات پیشین، فرورفتگی نوع a آثار نامطلوب بیشتری بر مقاومت کمانشی محوری پوسته‌ها دارد [1, 2, 22] و از این رو طبق توصیه آیین‌نامه [11] به در نظرگیری شکل نقص هندسی با آثار نامطلوب‌تر بر مقاومت سازه، همین شکل فرورفتگی در تحلیل‌های مقاله حاضر در نظر گرفته شده است. آیین‌نامه اروپا [11, 12] سه کلاس کیفیت ساخت^{۱۴} (FQC) یا عالی، B یا خوب و C یا متوسط را در تعریف نقص هندسی پوسته‌ها در نظر می‌گیرد. برای همگام سازی تحلیل‌ها با قوانین آیین‌نامه، دامنه فرورفتگی درز جوش براساس این سه کلاس تعیین و در تحلیل‌ها منظور شده است. در این راستا و با توجه به رابطه (۲)، مقدار δ_0 تعیین می‌شود:

$$\delta_0 = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{r}{t}} \quad (2)$$

در این رابطه، Q پارامتر کیفیت ساخت محوری است که به ترتیب برای کلاس A، B و C برابر با ۴۰، ۲۵ و ۱۶ است. بدین ترتیب و با توجه به ارتفاع ۲ متری باریکه‌های فولادی، در هر دو متر، یک درز جوش از نوع a در جداره سیلوها

شکل ۱. نمای شماتیک از سیلوهای مورد مطالعه.

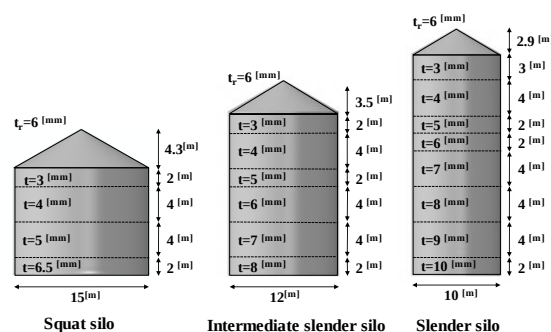


Fig. 1. Schematic view of silos under consideration.

شکل (۱) به صورت شماتیک، سیلوها و تغییرات ضخامت باریکه‌های سازنده جداره هر یک را نشان می‌دهد. در هر سیلو سقفی پوسته‌ای و مخروطی شکل، با ضخامت ورق t_r ۶ میلی‌متری و زاویه شیب ۳۰ درجه نسبت به افق، تغییر شکل‌های مرز بالایی سازه را کنترل می‌نماید. همچنین فرض شده است که جداره سازه‌ها از باریکه‌هایی به ارتفاع ۲ متر ساخته شده‌اند.

۲-۲- نقص هندسی در محل درز جوش

باریکه‌های سازنده سیلوها از قوس دادن به ورق‌های فولادی و جوش دادن آن‌ها به یکدیگر تشکیل می‌شوند.

شکل ۲. فرورفتگی در درز جوش پیرامونی سیلوهای فولادی.

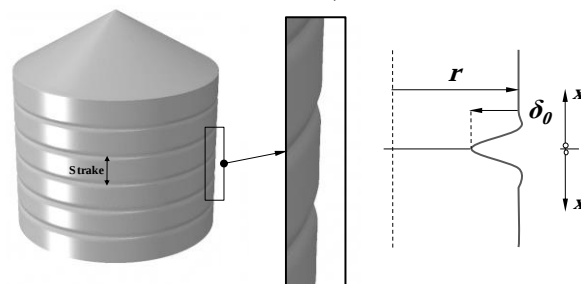


Fig. 2. Depressions at circumferential welded joints of steel silos.

از روی هم قرار گرفتن این باریکه‌های قوسی شکل، سیلوهای فولادی استوانه‌ای ساخته می‌شود؛ در پایان ساخت سیلو، در محل هر درز جوش، یک فرورفتگی مشاهده می‌شود (شکل ۲). این فرورفتگی عمدتاً ناشی از عملیات نورد ورق‌های فولادی (حالت فرخوردگی^{۱۲} لبه‌های ورق‌ها) و نیز

13 Linear meridional bending half wavelength

14 Fabrication Quality Class (FQC)

12 Curling

مدل‌سازی شده است (برای نمونه به شکل (۲) مراجعه شود). دامنه نقص هندسی اعمال شده در محل درز جوش باریکه‌ها، در جدول (۲) خلاصه شده است.

جدول ۲. دامنه نقص هندسی سیلوها.

t [mm]	$\delta o/t$ (FQC A, B, C)		
	Slender silo	Intermediate slender silo	Squat silo
10	(0.56, 0.89, 1.40)	-	-
9	(0.59, 0.94, 1.47)	-	-
8	(0.63, 1.00, 1.56)	(0.68, 1.10, 1.71)	-
7	(0.67, 1.07, 1.67)	(0.73, 1.17, 1.83)	-
6	(0.72, 1.15, 1.80)	(0.79, 1.26, 1.98)	(0.88, 1.41, 2.21)
5	(0.79, 1.26, 1.98)	(0.87, 1.39, 2.17)	(0.97, 1.55, 2.42)
4	(0.88, 1.41, 2.21)	(0.97, 1.55, 2.42)	(1.08, 1.73, 2.71)
3	(1.02, 1.63, 2.55)	(1.12, 1.79, 2.80)	(1.25, 2.00, 3.13)

Table 2- Geometric imperfections amplitudes of steel silos.

۲-۳- مدل سازی المان محدود

مدل‌سازی‌ها و تحلیل‌های المان محدود انجام گرفته در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار آباکوس/استاندارد [23] صورت پذیرفته است. در مدل‌ها، پای نمونه سیلوها به صورت مفصلی در نظر گرفته شده‌اند. همچنین جداره و سقف سازه‌ها، هر دو به وسیله المان پوسته ۴ گره‌ای دوپل انحنای (S4R) مش‌بندی شده است. این نوع المان، اجازه تغییر شکل‌های برشی و چرخش‌های بزرگ را می‌دهد و در کمانش پوسته‌های ضخیم و نازک کاربرد دارد [24].

مطالعه همگرایی اندازه مش‌های محاسباتی نیز به دقت صورت پذیرفته است؛ بر این اساس در هر دو جهت ارتفاعی و پیرامونی از اندازه مش ۰/۰۸ متر استفاده شده است. در مدل‌سازی جداره و سقف سیلوها، رفتار الاستوپلاستیک بدون سخت‌شوندگی با مقاومت جاری شدن (f_y) ۲۵۰ مگاپاسکال برای فولاد در نظر گرفته شده است. همچنین برای فولاد مصرفی، مقادیر مدول الاستیسیته (E) 2×10^5 مگاپاسکال، نسبت پواسون (ν) ۰/۳ و چگالی (ρ) ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب است.

لازم به توضیح است که روابط طرح دستی آیین‌نامه اروپا [11, 12] بر مبنای رفتار الاستیک-پلاستیک ایده‌آل هست [13]. بنابراین، برای امکان مقایسه نتایج تحلیل‌های عددی با روش دستی آیین‌نامه، رفتار بدون سخت‌شوندگی برای فولاد در مدل‌ها استفاده شده است. از طرفی در تمامی تحلیل‌های این پژوهش، کمانش در آستانه و همزمان با تشکیل موضعی مناطقی با سطح تنش تسلیم در جداره رخ داده است. به طوری‌که حتی با توسعه این مناطق در محدوده رفتار پس-کمانش، همچنان کرنش‌های پلاستیک در بازه مرسوم پله تسلیم^{۱۵} فولادهای کربنی ساختمانی^{۱۶} (کرنش پلاستیک معمولاً کمتر از ۱۵-۱۰ برابر کرنش تسلیم [13]) باقی می‌ماند و وارد ناحیه کرنش-سختی^{۱۷} نمی‌شود.

همچنین برای مدل‌سازی المان محدود درز جوش در نمونه سیلوها، ابتدا در محل هر درز با استفاده از تابع معرفی شده در رابطه (۱) و با توجه به دامنه نقص متناظر جدول (۲)، جابه‌جایی شعاعی اعمال می‌شود. محل جدید گره‌های سازنده هر سیلو در یک فایل ذخیره می‌شود. سپس در تحلیل اصلی، با فراخوانی فایل ذخیره شده در مرحله قبل، از طریق دستور IMPERFECTION پیش از شروع گام تحلیل کمانشی نرم‌افزار، شکل نقص هندسی اولیه در تحلیل‌ها لحاظ می‌شود.

۲-۴- بارگذاری سیلوها و روش تحلیل

در بحث بارگذاری تخلیه در سیلوها، طبق توضیحات آیین‌نامه اروپا [10]، عمده عوامل تعیین‌کننده عبارتند از: نسبت ابعادی سازه، کلاس ارزیابی اثر^{۱۸} (AAC)، میزان خروج از مرکزیت توده محتویات در بارگیری (e_f) و میزان خروج از مرکزیت دهانه تخلیه (e_o)، نوع سیلو (جداره نازک $d_o/t > 200$ و جداره ضخیم $d_o/t < 200$)، ضریب اصطکاک جداره (μ) و شکل سطح مقطع سیلو (دایروی و غیر دایروی^{۱۹}). علاوه بر موارد یاد شده، نوع مصالح ذخیره‌شده نیز از موارد کلیدی در تعیین بارگذاری سازه است.

15 Yield plateau

16 Structural carbon steels

17 Strain-hardening

18 Action Assessment Class (AAC)

19 Non-circular

$$Y_R(y) = (1 - \{(\frac{y - h_o}{y_o - h_o}) + 1\}^n) \quad (11)$$

$$n = -(1 + \tan \phi_r)(1 - h_o / y_o) \quad (12)$$

$$h_o = \frac{r}{3} \tan \phi_r \quad (13)$$

در روابط فوق روندی مشابه با آنچه برای سیلوی لاغر انجام گرفت، با اندکی تغییرات تکرار شده است. پارامتر h_o بیانگر مقدار y در اولین محل تماس محتویات با جداره استوانه‌ای نسبت به سطح معادل دانه‌ها و ϕ_r زاویه ریپوز^{۲۳} یا زاویه انباشت توده دانه‌ها مطابق جدول (۳) است. آیین‌نامه در تبدیل مؤلفه اصطکاکی فشار بارگیری به تخلیه در سیلوهای میانی و کوتاه نیز از رابطه (۸) استفاده می‌نماید؛ با این تفاوت که ضریب C_w ، برای سیلوی کوتاه برابر واحد بوده (ترکشن اصطکاکی در مرحله بارگیری و تخلیه یکسان است) و برای سیلوی میانی به صورت زیر، بر حسب ضریب تعدیل لاغری^{۲۴} C_s محاسبه می‌شود:

$$C_w = 1.0 + 0.10 C_s \quad (14)$$

$$C_s = h_c / d_c - 1.0 \quad (15)$$

طبق ضوابط آیین‌نامه، از حد بالای وزن مخصوص (γ_u) و همچنین حد بالای ضریب فشار جانبی $K = a_k K_m$ و ضریب اصطکاک $\mu = a_\mu \mu_m$ در طول مقاله استفاده شده است. a_μ و a_k ضرایبی برای در نظرگیری حد بالای کمیت‌های متناظر هستند. همچنین زیروند m مقدار میانگین کمیت را نشان می‌دهد. در انتخاب ضریب اصطکاک جداره، از فرض جداره نوع D2 که معادل سطوح فولادی صاف در سازه‌های جوشی و پیچی است، استفاده شده است. آیین‌نامه اروپا [10] مقادیر مختلف لازم برای تعیین فشار محتویات را برای مواد دانه‌ای مرسوم ارائه کرده است. مقادیر مربوط به محتویات مفروض (گندم) در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳. مشخصات گندم محتوی سیلوها.

γ_u [kN/m ³]	ϕ_r [°]	K_m	a_k	μ_m	a_μ
9	34	0.54	1.11	0.38	1.16

Table 3- Properties of ensiled wheat.

براساس آیین‌نامه، با توجه به ظرفیت سیلوها که حدود ۲۰۰۰ تن است و فرض بارگیری و تخلیه مرکزی در سیلوها، هر سه سیلوی مطالعه شده در کلاس ارزیابی اثر دو (AAC2) قرار می‌گیرند. سه کلاس‌بندی مختلف آیین‌نامه، سطوح سخت‌گیری در طرح سیلوها بر مبنای اعتمادپذیری آرایش سازه‌ای و استعداد سازه در برابر مدهای مختلف خرابی را مشخص می‌نماید. درجه سخت‌گیری کلاس یک بسیار کم و کلاس سه، سخت‌گیرانه‌ترین ضوابط طرح را دارد.

برای تعیین فشار ناشی از محتویات دانه‌ای در سیلوهای لاغر، توزیع فشار جَنَسَن^{۲۰} به صورت زیر توسط آیین‌نامه اروپا [10] مفروض است:

$$p_{hf}(y) = p_{ho} Y_J(y) \quad (3)$$

$$p_{wf}(y) = \mu p_{hf}(y) \quad (4)$$

$$p_{ho} = \gamma K y_o \quad (5)$$

$$y_o = \frac{1}{K \mu U} A \quad (6)$$

$$Y_J(y) = 1 - e^{-y/y_o} \quad (7)$$

در روابط فوق، $p_{hf}(y)$ توزیع فشار نرمال و $p_{wf}(y)$ توزیع ترکشن اصطکاکی ناشی از فرآیند بارگیری بر حسب متغیر y است که در شکل (۳) مشخص شده است. همچنین A و U به ترتیب سطح مقطع سیلو و محیط داخلی مقطع سیلو هستند. γ ، K و μ نیز به ترتیب مقادیر مشخصه وزن مخصوص، نسبت فشار جانبی و ضریب اصطکاک جداره می‌باشند. آیین‌نامه در تبدیل مؤلفه اصطکاکی فشار بارگیری به تخلیه، از ضریب تخلیه^{۲۱} مربوط به ترکشن اصطکاکی (C_w) با مقدار ۱/۱۰ در کلاس ارزیابی اثر دو (AAC2)، طبق رابطه زیر استفاده می‌نماید.

$$p_{we} = C_w p_{wf} \quad (8)$$

در رابطه با سیلوهای میانی و کوتاه، آیین‌نامه [10] از توزیع فشار رایمبرت اصلاح‌شده^{۲۲} با فرمول‌بندی زیر استفاده می‌نماید:

$$p_{hf}(y) = p_{ho} Y_R(y) \quad (9)$$

$$p_{wf}(y) = \mu p_{hf}(y) \quad (10)$$

20 Janssen

21 Discharge factor

22 Modified Reimbert

23 Angle of repose

24 Slenderness adjustment factor

شده است. همچنین فولاد مصرفی دارای مدول الاستیسیته 2×10^5 مگاپاسکال و نسبت بواسون 0.3 است. روتر و تنگ [1] با توجه به ضخامت نازک پوسته و کماتش در محدوده تقریباً الاستیک (اثر ناچیز پلاستیسیته)، از تحلیل غیرخطی کماتشی با مدل ماده الاستیک استفاده کرده‌اند.

شکل ۴. درستی آزمایی نتایج کماتشی: (الف) بدون فشار داخلی و (ب) با وجود فشار داخلی.

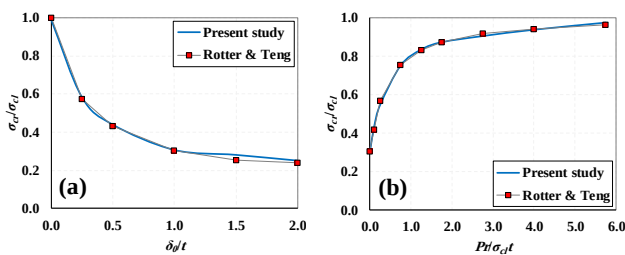


Fig. 4. Verification of buckling results: (a) unpressurized and (b) internally pressurized cases.

نتایج مقاله روتر و تنگ [1] در دو حالت مطرح بوده است. حالت اول شکل (۴-الف) با فرض عدم وجود فشار داخلی، میزان تنش کماتشی محوری (σ_{cr}) را اعلام می‌نماید. این مقادیر به صورت نرمال شده نسبت به تنش کلاسیک بحرانی الاستیک تحت فشار محوری $\sigma_{cr} = 0.605Et/r$ ارائه شده است. پارامتر متغیر در این حالت، دامنه فرورفتگی نرمال شده به ضخامت جداره (δ_0/t) است. در حالت دوم شکل (۴-ب) با ثابت نگاه داشتن دامنه فرورفتگی به اندازه یک‌برابر ضخامت جداره، مقاومت کماتشی پوسته به‌ازای مقادیر مختلف فشار داخلی (p) ، محاسبه شده است. فشار داخلی نیز به صورت بی‌بعد در نمودار متناظر این حالت در نظر گرفته شده است. با توجه به نمودارهای ارائه شده ذیل شکل (۴)، در هر دو حالت، هماهنگی مناسبی بین نتایج حاصل از مقاله روتر و تنگ [1] و مطالعه حاضر بدست آمده است.

۳- یافته‌ها و تفسیر نتایج

۳-۱- تحلیل‌های امان محدود

طبق روش تحلیل آیین‌نامه اروپا در بخش ۲-۴ و توزیع فشار شکل (۳)، بارگذاری هر یک از نمونه سیلوها انجام

آیین‌نامه اروپا [11-13] در روش طرح دستی یا طرح تنشی خود برای تعیین ظرفیت کماتشی محوری سیلوها تحت بار تخلیه، لازم می‌دارد که حداکثر ترکشن اصطکاکی ضریب-دار، به‌همراه فشار داخلی ناشی از فرآیند بارگیری و بدون اعمال ضریب‌بار، در محاسبات لحاظ شود. ضریب ایمنی جزئی برای بارهای سازه‌ای نامطلوب^{۲۵} یا به اختصار ضریب-بار (γ_F) که در بالا به آن اشاره شد، برای مؤلفه اصطکاکی فشار برابر با $1/5$ و برای فشار نرمال برابر با $1/0$ (یا عملاً بدون ضریب) است.

توزیع فشار نهایی اعمال شده بر هر سیلو در شکل (۳) نشان داده شده است. محور قائم در نمودارها نشان‌دهنده ارتفاع نرمال‌شده محتویات است. این ارتفاع در سیلوی لاغر از محل سطح معادل محتویات محاسبه و بر h_c نرمال شده است. در حالی‌که برای سیلوی میانی و کوتاه، ارتفاع از محل اولین برخورد محتویات به جداره حساب شده و بر $(h_c - h_0)$ نرمال شده است.

شکل ۳. توزیع فشار تخلیه اعمال شده بر نمونه سیلوی: (الف) لاغر، (ب) میانی و (ج) کوتاه.

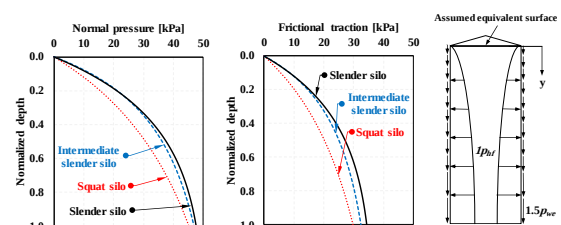


Fig. 3. Discharge pressures imposed on: (a) slender, (b) intermediate slender and (c) squat silo.

۲-۵- درستی آزمایی مدل‌ها

برای بررسی درستی تحلیل‌های انجام گرفته، نتایج مقاله روتر و تنگ [1] با مقادیر حاصل از این مطالعه مقایسه می‌شود. آن‌ها در مقاله خود، مقاومت کماتشی الاستیک پوسته-های استوانه‌ای تحت فشار محوری را بدست آوردند. استوانه مورد نظر نسبت ارتفاع به شعاع (L/r) برابر با ۳ و نسبت شعاع به ضخامت (r/t) برابر با ۱۰۰۰ دارد. در ارتفاع میانی سازه نیز یک نقص هندسی از نوع درز جوش نوع a تعبیه

شکل مُد اول کمانشی تحلیل‌های LBIA و مقدار متناظر نسبت $r_{Rd, LBIA}$ هر سیلو، با توجه به کلاس کیفیت ساخت مفروض، در شکل (۵) نمایش داده شده است. با توجه به شکل، با افزایش دامنه نقص هندسی (یعنی حرکت از کلاس ساخت عالی به متوسط)، کاهش در تعداد موج‌های کمانشی پیرامونی مشاهده می‌شود. همچنین تعداد نیم‌موج‌های کمانشی در جهت ارتفاعی افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش دامنه نقص هندسی، تعداد بیشتری درز جوش در مُد کمانشی مشارکت کرده‌اند. به علاوه، با توجه به مقادیر $r_{Rd, LBIA}$ برای هر سیلو، اثر پایین آمدن کیفیت ساخت (حرکت از کلاس A به کلاس C)، باعث کاهش بیشتری در ظرفیت کمانشی محوری سیلوهای لاغرتر می‌شود. برای نمونه اختلاف مقاومت کمانشی کلاس A نسبت به کلاس C در نمونه سیلوی لاغر حدود ۵۵ درصد، در سیلوی میانی حدود ۴۴ درصد و در سیلوی کوتاه، تنها حدود ۲۱ درصد است.

شکل ۵. فرم کمانش یافته خطی نمونه سیلوی: (الف) لاغر، (ب) میانی و (ج) کوتاه.

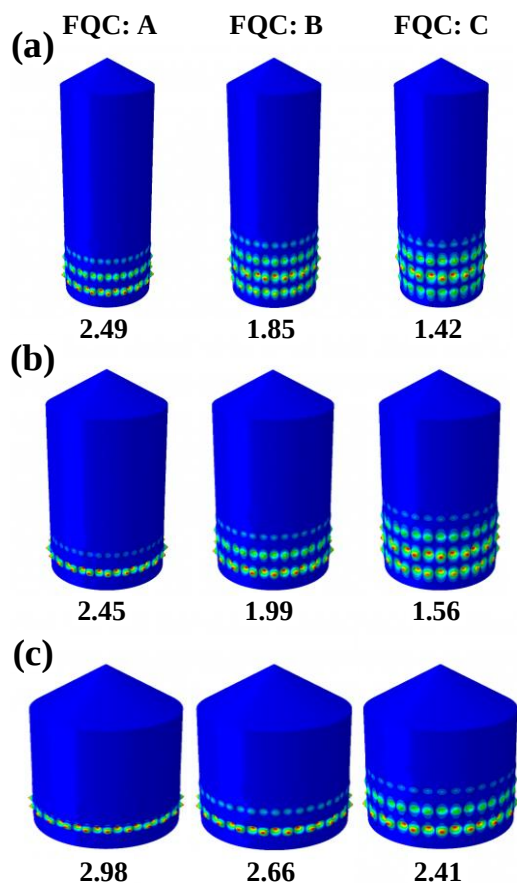


Fig. 5. Linear buckled forms of: (a) slender, (b) intermediate slender and (c) squat silo.

گرفت. بدین منظور پس از لحاظ کردن نقص هندسی اولیه (به بخش ۲-۳ مراجعه شود)، ابتدا هر سیلو تحت فشار داخلی محتویات قرار گرفته و سپس فشار محوری ناشی از ترکشن اصطکاکی اعمال می‌شود. بدین ترتیب، مقاومت کمانشی هر سازه براساس ضریب بار پایداری^{۲۷} (λ) که برابر با نسبتی از بار محوری وارد بر سازه پیش از وقوع خرابی کمانشی در آن است، محاسبه می‌شود.

ضریب بار پایداری بدست آمده ($\lambda = R_k / \gamma F E_k$)، مقاومت مشخصه هر سیلو (R_k) تحت بار ضریبدار اعمالی ($\gamma F E_k$) را نشان می‌دهد. مقدار بار مشخصه (E_k) سیلوها، همان فشار تخلیه ارائه شده هنگام رابطه (۱) تا رابطه (۱۵) است. مقادیر ضریب بار (γF) نیز در بخش ۲-۴ معرفی شده است. برای همگام‌سازی نتایج با قوانین آیین‌نامه، ضریب بار حاصل، بر ضریب ایمنی جزئی مقاومت برای پایداری^{۲۸} (γ_{MI}) با مقدار ۱/۱ تقسیم شده است [11]. بدین صورت، در طول مقاله نتایج بر حسب نسبت مقاومت طراحی کمانشی^{۲۹} ($r_{Rd} = \lambda / \gamma_{MI}$) اعلام می‌شوند. اعداد بزرگ‌تر از یک برای این نسبت، بیانگر تأیید مقاومت کمانشی سازه تحت بارهای وارد شده است [11, 12].

در آنالیزهای کامپیوتری، اساس کار بر انجام دو نوع تحلیل خطی مقدار ویژه^{۳۰} (LBA) و تحلیل غیرخطی با در نظرگیری آثار هندسی و مصالح^{۳۱} (GMNA) است. از طرفی با توجه به محوریت اثر نقص هندسی در این مقاله، تحلیل‌های LBIA و GMNIA که آثار نقص هندسی (Imperfection) در آن‌ها ملحوظ است، ملاک ارزیابی رفتار سیلوها و مقایسه با نتایج روش دستی در طول پژوهش بوده است. تصریح می‌شود که طبق ضوابط آیین‌نامه اروپا [11]، تحلیل LBA (یا LBIA) برای اطمینان از شناسایی صحیح نقطه دوشاخگی یا بایفرکیشن محتمل در مسیر غیرخطی بار-جابجایی سازه‌ها، لازم است در کنار تحلیل‌های غیرخطی انجام گیرد.

27 Stability load factor

28 Partial factor for resistance to buckling

29 Design buckling resistance ratio

30 Linear elastic Bifurcation Analysis (LBA)

31 Geometrically and Materially Non-linear buckling Analysis (GMNA)

همچنین در حرکت از سیلوی کوتاه به لاغر، اثرات کمانشی در تعداد درز جوش بیشتری بروز داشته است. با گسترش تغییر شکل‌ها و توسعه اثرات پلاستیسته، همین وضعیت در فُرم پس-کمانشی سیلوها نیز حفظ شده است. با این حال، اثرات کمانشی به فُرم مُد الماسی^{۳۲} در هر سه سیلو، در محل اولین درز جوش بیشترین تمرکز را دارد. موضوع اخیر با توجه به دامنه بزرگ‌تر نقص هندسی در باریکه‌های پایینی (به رابطه (۳) رجوع شود)، بانضمام فشارهای بزرگ‌تر در این ناحیه (به شکل (۳) رجوع شود) قابل توضیح است.

شکل ۷. نمودارهای غیرخطی بار-جابجایی محوری نمونه سیلوی:

(الف) لاغر، (ب) میانی و (ج) کوتاه.

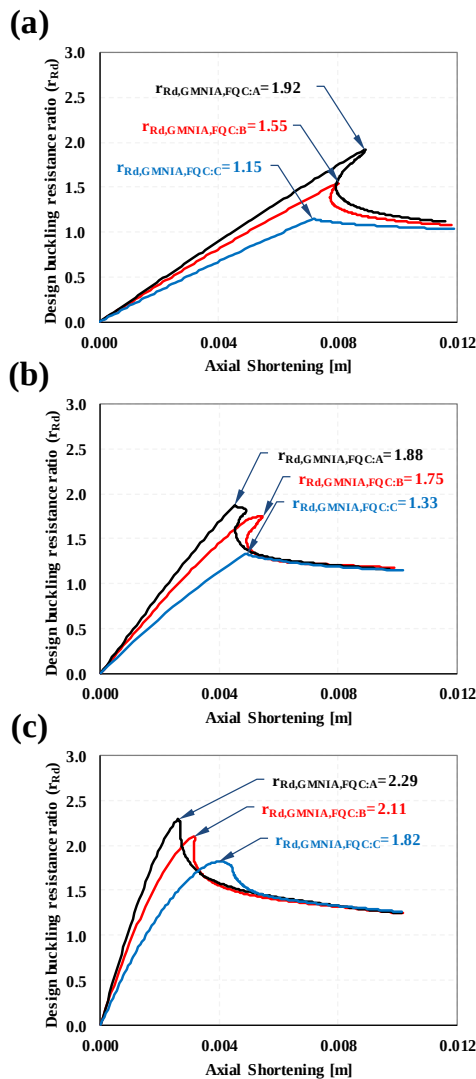


Fig. 7. Non-linear load-axial displacement curves of: (a) slender, (b) intermediate slender and (c) squat silo.

شکل (۶) فُرم کمانش‌یافته حاصل از تحلیل‌های GMNIA در لحظه کمانش و نیز فُرم پس‌کمانشی سیلوها پس از توسعه تغییرشکل‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به شباهت شکل کمانشی و پس-کمانشی سیلوها در کلاس‌های مختلف ساخت، تنها موارد مربوط به یکی از کلاس‌ها (کلاس ساخت A) در اینجا نمایش داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشخص است، در لحظه کمانش، در محل درز جوش باریکه‌های پایینی سیلوها، تنش تسلیم حادث شده است؛ پس کمانش در محدوده پلاستیک رخ داده است (در ابتدای محدوده پلاستیک).

شکل ۶. فُرم کمانش‌یافته غیرخطی نمونه سیلوی: (الف) لاغر، (ب) میانی و (ج) کوتاه.

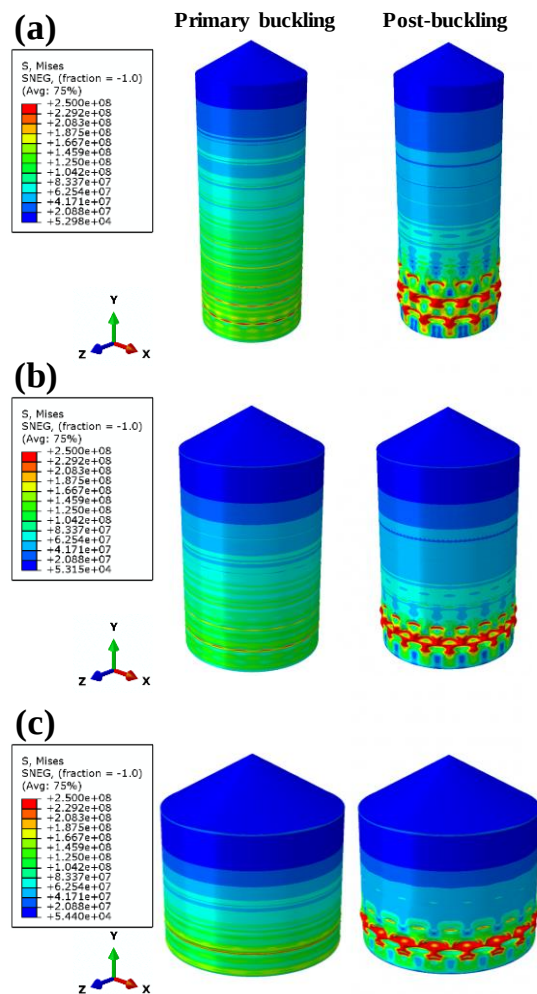


Fig. 6. Non-linear buckled forms of: (a) slender, (b) intermediate slender and (c) squat silo.

$$r_{Rd,EC} = \frac{\sigma_{x,Rd}}{\sigma_{x,Ed}} \geq 1.0 \quad (16)$$

در رابطه فوق σ_x ، تنش غشایی محوری است و زیروندهای اضافه شده Ed و Rd ، به ترتیب نشانگر مقدار تنش طراحی و مقدار مقاومت طراحی هستند. $r_{Rd,EC}$ نیز نسبت مقاومت طراحی کمانشی حاصل از آیین‌نامه اروپا (EuroCode) است. مقدار مقاومت طرح، به شکل زیر قابل محاسبه است:

$$\sigma_{x,Rd} = \sigma_{x,Rk} / \gamma_{M1} \quad (17)$$

در رابطه (۱۷) γ_{M1} ضریب ایمنی جزئی مقاومت برای پایداری با مقدار ۱/۱ و $\sigma_{x,Rk}$ مقدار مشخصه تنش است. مقدار مشخصه تنش کمانشی، از حاصل ضرب مقدار مشخصه مقاومت جاری شدن پوسته فولادی ($f_{yk}=f_y$) در ضریب کاهش کمانشی^{۳۷} (χ_x)، طبق رابطه (۱۸) بدست می‌آید:

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x f_{yk} \quad (18)$$

مقدار ضریب کاهش کمانشی در رابطه بالا، خود تابعی از لاغری نسبی^{۳۸} (λ_x) است (رابطه ۱۹):

$$\lambda_x = \sqrt{f_{yk} / \sigma_{x,Rcr}} \quad (19)$$

در رابطه فوق، مقدار بحرانی تنش کمانشی محوری الاستیک $\sigma_{x,Rcr}$ ، مطابق با پیوست D در آیین‌نامه اروپا [11]، از طریق رابطه (۲۰) قابل محاسبه است:

$$\sigma_{x,Rcr} = 0.605 E C_x \frac{t}{r} \begin{cases} \text{if } 1.7 \leq \omega \leq 0.5 \frac{r}{t} \\ \omega \end{cases} C_x = 1.0 \quad (20)$$

که در آن $\omega = l / \sqrt{rt}$ ، پارامتر بی‌بعد طول جهت تعیین پارامتر C_x و l برابر با مجموع ارتفاع باریکه‌ها، پیش از ایجاد تغییر در ضخامت جداره است. مقادیر r و t نیز شعاع و ضخامت موضعی در ارتفاع l است. پس از تعیین لاغری نسبی (λ_x)، مقدار ضریب کاهش کمانشی (χ_x) از رابطه (۲۱) بدست می‌آید:

$$\chi_x = \begin{cases} 1 & \text{when } \lambda_x \leq \lambda_0 \\ 1 - \beta \left(\frac{\lambda_x - \lambda_0}{\lambda_p - \lambda_0} \right)^\eta & \text{when } \lambda_0 \leq \lambda_x \leq \lambda_p \\ \alpha_{xp} / \lambda_x^2 & \text{when } \lambda_p \leq \lambda_x \end{cases} \quad (21)$$

در رابطه بالا β ضریب بازه پلاستیک با مقدار توصیه شده برابر با 0.6 ، η توان رابطه اندرکنش با مقدار توصیه شده برابر

نمودارهای غیرخطی بار-جابجایی^{۳۳} تحلیل‌های GMNIA نیز که با استفاده از الگوریتم ریکس^{۳۴} بدست آمده‌اند، در شکل (۷) نمایش داده شده است. محور قائم، نسبت مقاومت طراحی کمانشی و محور افقی، جابجایی قائم رأس سقف هر سیلو را نشان می‌دهد.

براساس شکل (۷)، در تمامی نمودارها بار نهایی در نقطه دوشاخگی مسیر تعادل^{۳۵} غیرخطی حادث شده است. پس از رسیدن به بار نهایی، ضمن تغییر در مسیر تعادل، کاهش در تراز باربری سازه دیده می‌شود. همچنین به ازای کلاس ساخت A و B، در نمونه سیلوی لاغر و میانی، رفتار اسنپ-بک^{۳۶} در مسیر تعادل ایجاد شده است. به علاوه، با افزایش دامنه نقص هندسی، نمودارها قدری همواره‌تر شده‌اند که این مورد به ویژه در مسیر تعادل مربوط به کلاس ساخت C دیده می‌شود. در نهایت برای هر سیلو و با رشد تغییرشکل‌های کمانشی، نمودار مربوط به هر یک از کلاس‌های ساخت، به یک تراز مقاومت همگرا شده‌اند.

مشابه روند حاصل در تحلیل‌های LBIA، در $r_{Rd,GMNIA}$ نیز با افزایش دامنه نقص هندسی، آثار کاهش مقاومت شدیدتری برای سیلوهای لاغرتر مشاهده می‌شود. به طور دقیق‌تر کاهش ۵۰، ۳۴ و ۲۳ درصدی ظرفیت باربری سیلوهای لاغر، میانی و کوتاه به ازای افزایش دامنه گودی از کلاس A به C بدست آمده است. همچنین لازم به یادآوری است که در مقایسه نتایج تحلیل‌های خطی و غیرخطی، مقادیر مقاومت کمتری توسط تحلیل‌های GMNIA پیش‌بینی شده است؛ به همین دلیل $r_{Rd,GMNIA}$ مبنای محاسبه ظرفیت سیلوه‌ها و مقایسه‌های آتی با روابط آیین‌نامه است.

۳-۲- طرح دستی (طرح تنشی) آیین‌نامه اروپا

مطابق با آیین‌نامه اروپا [11,12]، در کنترل عدم رخداد کمانش محوری در حضور فشار داخلی، لازم است رابطه (۱۶) برقرار باشد:

33 Non-linear load-displacement curves

34 Riks

35 Equilibrium path

36 Snap-back

37 Buckling reduction factor

38 Relative slenderness

با توجه به مقادیر $\%diff = (1 - r_{Rd,EC} / r_{Rd,GMNIA}) \times 100$ منعکس در جدول (۴)، در محدوده شکل نقص هندسی مفروض، روش طرح دستی آیین‌نامه تنها حدود ۱۳ تا ۳۲ درصد، ظرفیت کمانشی سیلوها را در جهت ایمنی، کمتر از روش کامپیوتری تخمین می‌زند. از این‌رو، روش دستی آیین‌نامه در تخمین ظرفیت کمانش محوری سیلوها در حضور فشار داخلی، بدون محافظه‌کاری زیاد، عملکرد مناسبی از خود نشان داده است. لازم به اشاره است که کمینه اختلاف دو روش در کلاس ساخت A (دامنه نقص کوچک‌تر) و بویژه در سیلوی لاغر بدست آمده است.

جدول ۴. مقایسه مقاومت کمانشی سیلوها در روش دستی و روش المان محدود.

Silo slenderness category	$\%diff = (1 - r_{Rd,EC} / r_{Rd,GMNIA}^{**}) \times 100$					
	$(\sigma_{x,Ed}^*, \sigma_{x,Rd}^*, r_{Rd,EC})$					
	FQC A	FQC B	FQC C	FQC A	FQC B	FQC C
Slender	(59.22, 99.54, 1.68)	(59.22, 68.85, 1.16)	(59.22, 50.43, 0.85)	12.50	25.16	26.09
Intermediate slender	(44.34, 65.98, 1.49)	(44.34, 52.87, 1.19)	(44.34, 40.97, 0.92)	20.74	32.00	30.83
Squat	(26.76, 47.04, 1.76)	(26.76, 40.36, 1.51)	(26.76, 33.78, 1.26)	23.14	28.44	30.77

* $\sigma_{x,Ed}$ and $\sigma_{x,Rd}$ in MPa

** $r_{Rd,GMNIA}$ values are shown in Fig.7

Table 4- Comparison of buckling resistances of silos calculated by the hand design procedure and the finite element method.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر نقص هندسی به شکل فرورفتگی در محل درز جوش پیرامونی سیلوهای فولادی هنگام فرآیند تخلیه مورد بررسی قرار گرفته است. بار تخلیه در سیلوها توزیعی دو جهته دارد که باعث ایجاد فشار محوری همزمان با فشار داخلی بر جداره سازه می‌شود. آیین‌نامه اروپا [11-13] به عنوان پیشرفته‌ترین آیین‌نامه در زمینه طرح سیلوهای فولادی، روشی دستی برای طرح کمانشی سیلوها تحت بار تخلیه ارائه می‌نماید. در این مطالعه، با استفاده از تحلیل‌های المان محدود، ضمن در نظرگیری اثر نقص هندسی در محل

با ۱/۰ و λ_0 حد فشردگی لاغری نسبی با مقدار پیشنهاد شده ۰/۲ است [11]. همچنین λ_p حد پلاستیک لاغری نسبی، طبق رابطه (۲۲) است:

$$\lambda_p = \sqrt{\alpha_{xp} / (1 - \beta)} \quad (22)$$

α_{xp} نیز ضریب کاهش نقص الاستیک تحت فشار^{۳۹} است که به صورت رابطه (۲۳) ارائه می‌شود:

$$\alpha_{xp} = \alpha_x + (1 - \alpha_x) \left[\frac{\bar{p}_s}{\bar{p}_s + 0.3 / \alpha_x^{0.5}} \right] \quad (23)$$

در رابطه بالا p_s کوچک‌ترین مقدار موضعی فشار داخلی طرح می‌باشد که با توجه به فشار نرمال جداره با ضریب-بار $\gamma_F = 1/0$ ، حین بارگیری سیلو تعیین می‌شود. همچنین α_x ضریب کاهش نقص الاستیک محوری با رابطه زیر است (δ_0) پیش‌تر در رابطه (۲) ارائه شده بود:

$$\alpha_x = \frac{0.62}{1 + 1.91(\delta_0 / t)^{1.44}} \quad (24)$$

با استفاده از روابط فوق و با در نظرگیری توزیع فشار شکل (۳)، مقدار $\sigma_{x,Rd}$ در محل درز جوش هر سیلو، در هر کلاس ساخت، محاسبه شد. مقدار $\sigma_{x,Ed}$ نیز با استفاده از تحلیل الاستیک خطی پوسته‌ها^{۴۰} (LA) تحت توزیع فشار مفروض بدست آمد [11]. در هر سه سیلو و در تمامی کلاس‌های ساخت A، B و C، اولین محل درز جوش که در آن تغییر در ضخامت باریکه نیز رخ داده است، کنترل‌کننده شد. لازم به اشاره است که در تحلیل‌های GMNIA نیز تمرکز آثار کمانشی در همین ناحیه مشاهده شد (شکل ۶).

خلاصه مقادیر استخراج‌شده در محل اولین درز جوش در جدول (۴) آورده شده است. با توجه به نتایج، روش دستی آیین‌نامه مشابه تحلیل‌های کامپیوتری، بیشترین و کمترین اثر نامطلوب نقص هندسی را به ترتیب برای سیلوی لاغر و سیلوی کوتاه نتیجه می‌دهد. به صورت کمی، روش دستی برای سیلوهای لاغر، میانی و کوتاه در کلاس ساخت C نسبت به A، ۶۵، ۴۷ و ۳۳ درصد مقاومت کمانشی کمتری تخمین می‌زند.

است؛ از این رو همین نتایج باید مبنای محاسبه ظرفیت سیلوها قرار گیرد.

در پایان در مقایسه نتایج روش دستی آیین‌نامه با نتایج تحلیل‌های GMNIA، در محدوده شکل نقص هندسی مفروض برای سیلوها، روش طرح دستی تنها حدود ۱۳ تا ۳۲ درصد، ظرفیت کمانشی را در جهت ایمنی، کمتر از روش کامپیوتری تخمین می‌زند. بنابراین در چارچوب مطالعه انجام شده، روش طرح دستی عملکرد رضایت‌بخشی از خود نشان داده است.

۵- سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی بنیاد ملی نخبگان در قالب جایزه پسا دکتری شهید چمران [۱۵/۱۳۳۶۳] انجام شده است.

References

۶- مراجع

- [1] Rotter J. M., Teng J. G. 1989 Elastic stability of cylindrical shells with weld depressions. *Journal of Structural Engineering*, 115, 1244–1263.
- [2] Rotter J. M., Zhang Q. 1990 Elastic buckling of imperfect cylinders containing granular solids. *Journal of Structural Engineering*, 116, 2253–2271.
- [3] Maleki S., Mehrehtehran A. M. 2019 3D wind buckling analysis of steel silos with stepped walls. *Thin-Walled Structures* 142, 236–261.
- [4] Maleki S., Mehrehtehran A. M. 2018 3D wind buckling analysis of long steel corrugated silos with vertical stiffeners. *Engineering Failure Analysis*, 90, 156–167.
- [5] Mehrehtehran A. M., Maleki S. 2018 3D buckling assessment of cylindrical steel silos of uniform thickness under seismic action. *Thin-Walled Structures* 131, 654–667.
- [6] Cao Q., Zhao Y. 2018 Buckling design of large eccentrically filled steel silos. *Powder Technology*, 327, 476–488.
- [7] Sadowski A. J., Rotter J. M. 2011 Steel silos with different aspect ratios: I—Behaviour under concentric discharge. *Journal of Constructional Steel Research*, 67, 1537–1544.
- [8] Sadowski A. J., Rotter J. M. 2010 Study of buckling in steel silos under eccentric discharge flows of stored solids. *Journal of Engineering Mechanics*, 136, 769–776.
- [9] Sadowski A. J., Rotter J. M. 2011 Buckling of very slender metal silos under eccentric discharge. *Engineering Structures*, 33, 1187–1194.
- [10] EN 1991-4. 2006 Eurocode 1: Actions on structures - Part 4: Silos and tanks. Brussels: CEN.
- [11] EN 1993-1-6. 2007 Eurocode 3: Design of

درز جوش به‌عنوان پارامتر اصلی مورد بررسی، ابتدا رفتار کمانشی و پس-کمانشی سه نمونه سیلوی مفروض در مقاله بدقت تشریح و سپس روش طرح آیین‌نامه ارزیابی شده است. نتایج زیر بر اساس یافته‌های این مطالعه قابل ارائه است:

شکل مُد کمانشی تحلیل‌های خطی LBIA، به صورت موج‌های کمانشی پیرامونی در محل درز جوش باریکه‌های پایینی جداره سازه نمایان می‌شود. با افزایش دامنه نقص هندسی (یعنی حرکت از کلاس ساخت عالی (A) به متوسط (C)، کاهش در تعداد موج‌های کمانشی پیرامونی مشاهده می‌شود. همچنین در این حالت، تعداد نیم‌موج‌های کمانشی در جهت ارتفاعی افزایش یافته و تعداد بیشتری درز جوش در مُد کمانشی مشارکت می‌نمایند.

براساس نتایج تحلیل‌های غیرخطی GMNIA، در تمامی موارد، کمانش در ابتدای محدوده پلاستیک رخ می‌دهد. همچنین در هر سه سیلو، آثار کمانشی به فُرم مُد الماسی در محل اولین درز جوش، بیشترین تمرکز را دارد. موضوع اخیر با توجه به دامنه بزرگتر نقص هندسی در باریکه‌های پایینی، بانضمام فشارهای بزرگتر در این ناحیه قابل توضیح است.

نمودارهای غیرخطی بار-جاب‌جایی همگی نقطه دوشاخگی را در مسیر تعادل سیلوها در محل بارنهایی نشان می‌دهند. پس از این نقطه، هر نمودار با تغییر در شیب و مسیر تعادل، روندی کاهشی را پی می‌گیرد. در نهایت این مسیر کاهشی به‌ازای تغییر شکل‌های کمانشی بزرگ، برای کلاس‌های مختلف ساخت هر سیلو، به یک تراز مشخص ظرفیت همگرا می‌شود.

کاهش ۵۰، ۳۴ و ۲۳ درصدی ظرفیت باربری سیلوهای لاغر، میانی و کوتاه به‌ازای افزایش دامنه گودی از کلاس A به C از تحلیل‌های GMNIA به دست می‌آید (مقادیر عددی دامنه گودی در جدول (۲) ارائه شده است). بنابراین، با افزایش دامنه نقص هندسی، آثار کاهش مقاومت شدیدتری در سیلوهای لاغرتر مشاهده می‌شود. همچنین لازم به یادآوری است که در مقایسه نتایج تحلیل‌های خطی و غیرخطی، مقادیر مقاومت کمتری توسط تحلیل‌های GMNIA پیش‌بینی شده

structural behavior of circular flat-bottomed steel silos. *Thin-Walled Structures*, 42, 1519–1542.

[20] Mehretehan A. M. 2019 Discharge buckling assessment of slender silos considering different forms of Eurocode patch load. 3rd International Conference on Applied Researches in Structural Engineering and Construction Management, Tehran.

[21] Cao Q. S., Zhao Y., Xing L., Zhang R., Li B.Y. 2019 Nonlinear buckling of cylindrical steel silos with fabrication cracks. *Powder Technology*, 353, 219–229.

[22] Teng J. G., Rotter J. M. 1992 Buckling of pressurized axisymmetrically imperfect cylinders under axial loads. *Journal of Engineering Mechanics*, 118, 229–247.

[23] Dassault Systèmes Simulia. 2012 Abaqus CAE User's Manual.

[24] Sadowski A. J., Rotter J. M. 2013 Solid or shell finite elements to model thick cylindrical tubes and shells under global bending. *International Journal of Mechanical Sciences*, 74, 143–153.

steel structures - Part 1-6: Strength and stability of shell structures. Brussels: CEN.

[12] EN 1993-4-1. 2007 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 4-1: Silos. Brussels: CEN.

[13] Rotter J. M., Schmidt H. 2008 Buckling of Steel Shells: European Design Recommendations. 5th edition. European Convention for Constructional Steelwork (ECCS).

[14] Song C. Y., Teng J. G. 2003 Buckling of circular steel silos subject to code-specified eccentric discharge pressures. *Engineering Structures*, 25, 1397–1417.

[15] DIN 1055-6. 1987 Design loads for buildings: loads in silo bins. Berlin: Deutsches Institut für Normung.

[16] ISO 11697. 1995 Basis for design of structures-loads due to bulk materials.

[17] ENV 1991-4. 1995 Eurocode 1: basis of design and actions on structures, Part 4: actions in silo and tanks. Brussels: European Committee for Standardisation.

[18] AS 3774-1996. 1996 Loads on bulk solids containers. Sydney: Standards Australia.

[19] Song C. Y. 2004 Effects of patch loads on

Discharge buckling assessment of example cylindrical steel flat-sheet silos with depressions in circumferential welded joints

Alireza Moazezi Mehretehran^{1*}, Shervin Maleki²

1-Postdoctoral Fellow, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology

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

*a.moazezi@sharif.edu

Abstract:

Steel cylindrical silos are key storages in many industries. They can be composed of flat or corrugated sheets. To construct these structures, steel sheets may be welded or bolted to each other. This study addresses steel welded silos with flat sheets. Different loads, such as, filling and discharge loads, wind load, seismic load and thermal loads should be considered in design of silos. Nevertheless, during the life cycle of a silo, filling and discharge of particulate solids exert the most frequent loads on the silo walls. Due to larger values of discharge pressures as compared with those of filling pressures, discharge loads are primarily considered for structural design of silos.

Due to small wall thickness, buckling resistance is of vital importance in steel silos design. Ensiled materials exert normal pressures and frictional tractions on silo walls. Accordingly, during discharge process, meridional buckling resistance of shell walls concurrent with internal pressures should be assessed. It is well known that buckling strength is very sensitive to geometric imperfections in shell structures. In welded silos, the most regular and well-defined imperfection is local depressions existing in circumferential welded joints due to the plate rolling process and shrinkage of the weld. The assumed shape given for this type of imperfection in the literature were adopted throughout the paper.

Eurocode as the most advanced and pioneering standard on the design of steel silos, provides a hand design procedure for buckling evaluation of steel silos under discharge loads. To assess the procedure, a full suite of computational shell buckling calculations was performed with special emphasis on the effect of aforementioned geometric imperfection. A slender, an intermediate slender and a squat silo were considered for the assessments. Linear elastic Bifurcation Analysis with Imperfections (LBIA) and Geometrically and Materially Non-linear Analysis with Imperfections (GMNIA) were carried out for each structure. Sample silos were loaded in accordance to the pressure distribution proposed in the Eurocode. By assuming strake's height of 2 meters, uniform depressions were simulated in circumferential welded joints of each silo. Three different Fabrication Quality Classes (FQCs) denoted by FQC A, B and C in a descending order from Excellent to Normal Class were introduced in the Standard. The imposed depression amplitudes were calculated in accordance to FQCs of the silos.

Considering the results obtained, the LBIA buckling modes show several circumferential buckling waves at the first welded joint of each silo from the base. Lowering the FQC leads to the decrease in number of circumferential waves and to the development of buckling waves at the location of second and third welded joints. Nevertheless, the more sophisticated GMNIA analyses predict elastic-plastic buckling mode in the form of diamond pattern concentrated at the first welded joint of the silos from the base, irrespective of selected FQC. However, for the slender silo the two upper welded joints are also interact during buckling. With respect to the design buckling resistance ratios (r_{Rd}) obtained by hand calculations and through non-linear analyses, the former method has predicted r_{Rd} values in the range from 13% to 32% lower than those of GMNIA. Therefore, hand design procedure of Eurocode produced satisfactory results, without high conservatism. However, more researches on this issue can enhance the reliability of conclusions made with respect to the Eurocode provisions.

Keywords: Steel cylindrical silos, Geometric imperfection, Buckling, Eurocode, Discharge pressure