

بررسی اثر ضریب اصطکاک جداری در مقاومت کمانشی سیلوهای فولادی با جداره صاف 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@student.sharif.edu

تاریخ پذیرش ۹۹/۲/۲۵

تاریخ دریافت ۹۸/۰۸/۱۳

چکیده

سیلوهای استوانه‌ای فولادی از جمله سازه‌های کلیدی در بیشتر بخش‌های صنعتی و کشاورزی به‌شمار می‌روند که وظیفه نگهداری مواد دانه‌ای را برعهده دارند. بارهای مختلفی همچون بارهای ناشی از فرآیند بارگیری و تخلیه سیلوها، بار باد، بار زلزله و بارهای حرارتی، لازم است در طرح سیلوها در نظر گرفته شود. با این وجود، نظر به کارکرد اصلی سیلوها که ذخیره‌سازی محتویات دانه‌ای است، پر تکرارترین باری که در چرخه عمر این سازه‌ها تجربه می‌شود، بارهای ناشی از فرآیند بارگیری و تخلیه است. ازطرفی، معمولاً فشار بزرگ‌تری طی مرحله تخلیه در قیاس با مرحله بارگیری بر جداره سیلوها وارد می‌شود؛ از این رو، اساس طرح اولیه سیلوهای فولادی بر پایه فشارهای تخلیه است. این درحالی است که بنابر ضخامت اندک جداره، بحث خرابی کمانشی در این سازه‌ها مطرح است. تحت فشار تخلیه نیز که با ایجاد فشار محوری و کشش پیرامونی قابل توجه در پای سیلوها همراه است، مُد کمانش الاستیک-پلاستیک پافیلی متصور است. ضریب اصطکاک جداری بین سیلو و محتویات دانه‌ای، پارامتری تأثیرگذار در تعیین اندازه و توزیع فشار تخلیه در سیلوها به حساب می‌آید. برای تعیین چگونگی اثرگذاری این پارامتر بر نتایج مقاومت کمانشی سیلوهای ورق صاف فولادی، سه نمونه سیلوی جداره متغیر در این پژوهش در نظر گرفته شد. هر یک از سیلوها تحت بارگذاری تخلیه پیشنهادی آیین‌نامه اروپا قرار گرفتند. با انجام تحلیل‌های سب‌بعدی خطی و غیرخطی کمانشی در نرم‌افزار آباکوس، مقاومت و رفتار کمانشی این سه نمونه سیلو به ازای مقادیر مختلف ضریب اصطکاک جداری که بین ۰/۲ تا ۰/۶ تغییر می‌کند، ارزیابی شد. همچنین کفایت روابط آیین‌نامه اروپا در طرح تنش پوسته‌های استوانه‌ای تحت فشار محوری توأم با فشار داخلی، مورد سنجش قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصل، با وجود توزیع فشارهای متفاوت ناشی از تغییر در ضریب اصطکاک جداری، اثر این ضریب در مقاومت کمانشی تحت بار تخلیه نمونه سیلوهای مطالعه شده، کاملاً اندک (با بیشینه تفاوت تا ۸٪) ارزیابی شد. به علاوه، حداکثر تفاوت در تخمین مقاومت پافیلی نمونه سیلوها با روش آیین‌نامه نسبت به روش تحلیل کامپیوتری، محدود به ۲۵٪ (و همواره در جهت ایمنی) محاسبه شد که نشانگر عملکرد مناسب روابط آیین‌نامه است.

واژگان کلیدی: سیلوهای استوانه‌ای فولادی، کمانش، آیین‌نامه اروپا، فشار تخلیه، نرم‌افزار آباکوس

۱- مقدمه

سیلوهای فولادی از سازه‌های کلیدی برای ذخیره‌سازی مواد دانه‌ای در بسیاری از صنایع و کارخانجات هستند. شکل‌های متفاوتی از این سازه در جای‌جای زنجیره تأمین مواد خام اولیه، وجود دارد. در این میان، سیلوهای استوانه‌ای ورق صاف و موجدار فولادی، دو نوع عمده به‌شمار می‌آیند. اگرچه لازم است چند نوع بار مختلف همچون بار باد [3-1]، بار لرزه‌ای [4] و بارهای ناشی از بارگیری و تخلیه [8-5]، در طرح سیلوها در نظر گرفته شود؛ پُرترکارین باری که سیلوها در طول عمر خود تجربه می‌کنند، مربوط به فشار بارگیری و تخلیه محتویات است. همچنین با توجه به فشار بزرگ‌تر فرآیند تخلیه در مقایسه با فشار بارگیری [9]، فشار تخلیه طرح کمانشی را کنترل می‌نماید.

به دلیل افزایش پیوسته تنش ناشی از محتویات از بالا به پای سازه، سیلوهای فولادی اغلب به صورت جداره متغیر در ارتفاع ساخته می‌شوند. همچنین با توجه به ضخامت اندک جداره، طراحی کمانشی تحت بارهای اعمالی در این سازه‌ها حائز اهمیت است. تحت فشار تخلیه، جداره سیلو به ویژه در پای آن، تحت فشار محوری و کشش پیرامونی قابل توجه قرار می‌گیرد که دو عامل اصلی در ایجاد مُد کمانش الاستیک-پلاستیک (کمانش غیرارتجاعی) پافیلی است.

در تعیین بارگذاری سیلوها، مشخصات محتویات دانه‌ای باید از نتایج آزمایشگاهی و یا داده‌های معتبر دیگر بدست آید. آیین‌نامه‌های طراحی سیلو نیز معمولاً این مشخصات را برای مواد دانه‌ای متداول توصیه می‌نمایند. از میان این مشخصات، ضریب اصطکاک جداری^۱ (μ)، متغیری کلیدی در تعیین توزیع فشار وارد از محتویات بر جداره سیلوها است. این ضریب عمدتاً وابسته به ویژگی‌های سطح جداره سازه و نوع محتویات است. ضریب اصطکاک جداری در گذر زمان و تحت عواملی همچون: ۱- خوردگی شیمیایی در اثر واکنش بین دانه‌ها، رطوبت و جداره؛ ۲- ساییدگی، فرسودگی و زبر شدن جداره؛ ۳- صیقلی شدن جداره در اثر فرآیندهای مکرر

بارگیری و تخلیه و ۴- برجا ماندن ته‌مانده‌های چرب و روغنی دانه‌ها بر جداره [9]، می‌تواند دستخوش تغییر شود.

به علاوه، مقادیر حاصل از انجام آزمایش برای تعیین ضریب اصطکاک می‌تواند با توجه به بحث ابعاد آزمایش، میزان رطوبت، جهت‌گیری دانه‌ها، آثار دینامیکی و سطح تنش موجود در حین آزمایش در مقایسه با آنچه در یک سیلوی واقعی رخ می‌دهد، متفاوت باشد [9]. بنابراین تعیین مقدار دقیق این پارامتر در عمل میسر نبوده و در نظر گرفتن یک طیف برای مقادیر محتمل این ضریب، به‌نظر مناسب می‌آید. بر همین اساس آیین‌نامه اروپا [9] یک حد پایین و یک حد بالا را برای ضریب اصطکاک جداری در نظر می‌گیرد. اما بیشتر در بحث طراحی کمانشی سیلوها تحت فشار محتویات، حد بالای این ضریب که منجر به ترکشن اصطکاکی^۲ بزرگ‌تر و در نتیجه فشار محوری بزرگ‌تر در دیواره سیلوها می‌شود، ملاک قرار می‌گیرد. این درحالی است که اثر مقادیر مختلف اصطکاک جداری بر مقاومت و رفتار کمانشی سیلوها کاملاً مشخص نیست.

در رابطه با بررسی رفتار کمانشی سیلوهای ورق صاف فولادی تحت بار تخلیه، چندین پژوهش انجام شده است. سادوسکی و روتر [10] به تحلیل المان محدود و تعیین مقاومت کمانشی پنج نمونه سیلوی فولادی جداره متغیر تحت تخلیه بدون خروج از مرکزیت (تخلیه مرکزی^۳) پرداختند. در این مطالعه روش طرح دستی سیلوها برای کمانش الاستیک فشاری بر اساس مجموعه آیین‌نامه‌های اروپا [9, 11, 12] در مقابل نتایج تحلیل‌های المان محدود کامپیوتری مقایسه شده و به محافظه‌کارانه بودن نسبی روش طرح دستی اشاره شد. آن‌ها همچنین در دو مطالعه دیگر خود [8, 13] به بررسی اثر فشار تخلیه با خروج از مرکزیت^۴ در مقاومت کمانشی نمونه سیلوهای 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.

2 Frictional traction

3 Concentric discharge

4 Eccentric discharge

1 Wall friction coefficient

کمی بعد، ژائو و همکاران [14] به بررسی مقاومت کمانشی یک نمونه سیلوی کوتاه ورق صاف فولادی تحت بار باد پرداختند. در این راستا دو حالت سیلوی خالی از محتویات و سیلوی پر در نظر گرفته شد. پس از آن، کائو و همکاران [3] برای گسترش پژوهش پیشین [14]، به مقایسه مقاومت کمانشی شش نمونه سیلوی فولادی جداره صاف تحت سه بارگذاری مختلف پرداختند. آن‌ها بار باد بر سیلوی خالی، بار باد بر سیلوی پر و بار تخلیه مرکزی را در تحلیل‌های خود در نظر گرفتند. توجه اصلی این پژوهش معطوف به تعیین شدت باد بحرانی بود که منجر به مقاومت کمانشی یکسان برای نمونه سیلوهای خالی و پر می‌شد. همچنین در پژوهشی دیگر، کائو و همکاران [15] اثر ترک‌های حین ساخت^۵ بر جداره نمونه سیلوهای لاغر تحت بار تخلیه آیین‌نامه اروپا [9] 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 بررسی کردند.

در نهایت ملکی و مهرطهران [1] مقاومت کمانشی سه نمونه سیلوی ورق صاف جداره متغیر فولادی را تحت بار باد، بار تخلیه و ترکیب بار باد و تخلیه، با روش المان محدود بدست آوردند. اگرچه هدف اصلی این پژوهش تبیین اثر اضافه فشار ناشی از بار باد بر سیلوهای هوادهی^۶ شده بود؛ اما اثر بار باد، به عنوان بار همراه با بار تخلیه، در مقاومت کمانشی نمونه سیلوهای مطالعه شده، کم و حاشیه‌ای ارزیابی شد.

در تمامی مطالعات یاد شده، برای تعیین فشار محتویات دانه‌ای بر جداره سیلوها، از حد بالای ضریب اصطکاک جداره، بر اساس مقادیر معرفی شده در آیین‌نامه اروپا [9] استفاده شده است و هیچ مطالعه‌ای به‌طور مشخص اثر ضریب اصطکاک جداره بر مقاومت کمانشی سیلوها در خلال فرآیند تخلیه را مورد بررسی قرار نداده است. از این رو این مطالعه به بررسی اثر این ضریب بر مقاومت کمانشی سیلوهای فولادی می‌پردازد. در این راستا سه نمونه سیلوی جداره متغیر

کوتاه^۷، میانی^۸ و لاغر^۹ که در آن‌ها ضریب اصطکاک جداره بین مقادیر ۰/۲ تا ۰/۶ تغییر می‌یابد، انتخاب شده است. جهت کمی‌سازی اثر این ضریب بر نتایج مقاومت کمانشی، از تحلیل‌های سه‌بعدی غیرخطی با در نظرگیری آثار هندسی و مصالح^{۱۰} (GMNA) در کنار تحلیل‌های خطی مقدار ویژه^{۱۱} (LBA)، استفاده شده است. همچنین با توجه به اینکه توزیع فشار تخلیه در سیلوها باعث ایجاد فشار محوری و داخلی در سازه می‌شود، کفایت روابط آیین‌نامه اروپا [11,12] در طرح تنش پوستانه‌های استوانه‌ای تحت فشار همزمان محوری و داخلی در برابر نتایج تحلیل‌های المان محدود ارزیابی شد. لازم به توضیح است که مجموعه آیین‌نامه‌های اروپا [9, 11, 12]، در طرح سیلوها و پوستانه‌ها، جزو پیشرفته‌ترین و بروزترین آیین‌نامه‌های بین‌المللی به شمار می‌روند و به همین دلیل از مجموعه ضوابط آیین‌نامه‌های اروپا در طول این مقاله استفاده شده است.

نظر به مطالب ارائه شده، نوآوری‌های عمده این مقاله عبارتند از:

- ۱- تبیین اثر ضریب اصطکاک جداره بر مقاومت کمانشی سیلوهای ورق صاف فولادی با جداره متغیر؛ و
- ۲- ارزیابی روابط آیین‌نامه اروپا در طرح تنش پوستانه‌های استوانه‌ای تحت فشار محوری همراه با فشار داخلی در مقابل نتایج تحلیل‌های المان محدود کامپیوتری.

۲- مدل‌های عددی

۲-۱- سیلوهای مورد مطالعه

به‌منظور پوشش نسبت‌های ابعادی عملی (نسبت ارتفاع به قطر سیلو) و در عین حال مطابق با دسته‌بندی انجام گرفته در آیین‌نامه اروپا [9]، یک سیلوی کوتاه، یک سیلوی میانی و یک سیلو لاغر در این مقاله تحلیل می‌شود. مشخصات هندسی این سازه‌ها در جدول (۱) خلاصه شده است. برای سیلوی

7 Squat

8 Intermediate slender

9 Slender

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

11 Linear Bifurcation Analysis (LBA)

5 Fabrication cracks

6 Vented silos

۲-۲- مدل سازی المان محدود

مدل سازی ها و تحلیل های انجام گرفته در طول مقاله، همگی به وسیله نرم افزار آباکوس/استاندارد [17] صورت پذیرفته است. با توجه به تقارن مسئله، تنها نیمی از هر سازه مدل شده است. لازم به اشاره است که درستی نتایج مدل نیمه در مقابل مدل سازی کامل سازه نیز کنترل شده است. پای سیلوها از نوع مفصلی در نظر گرفته شده و شرایط مرزی تقارن نیز در محل صفحه تقارن مدل ها اعمال شده است. همچنین سقف سازه به لبه بالایی بدنه استوانه ای هر سیلو مفصل شده است.

لازم به اشاره است که در بحث مقاومت کمانشی پافیلی در سیلوها، استفاده از شرایط مرزی گیردار در پای سازه در مقایسه با حالت مفصلی می تواند تا حدود ۱۵٪ مقاومت بیشتری را حاصل دهد [18, 19]. اما رابطه ارائه شده در آیین نامه اروپا [11, 12] در تخمین کمانش پافیلی سیلوها (به بخش ۳-۲ مراجعه شود)، فرض بر شرایط مرزی مفصلی دارد. مطالعات پیشین [1, 3, 5, 8, 10, 13, 14] نیز از فرض مفصلی در مدل سازی پای سیلوهای فولادی تحت بار تخلیه استفاده کرده اند. بنابراین مطابق با مطالعات پیشین و همچنین به منظور امکان مقایسه نتایج عددی با روابط آیین نامه که در مقاله انجام شده است، از فرض مفصلی بودن در پای سیلوها استفاده شده است.

جداره و سقف سازه، هر دو به وسیله المان پوسته ۴ گره-ای دوپل انحنای^{۱۳} (S4R) ساخته شده است. این نوع المان، اجازه تغییر شکل های برشی و چرخش های بزرگ را می دهد و در کمانش پوسته های ضخیم و نازک کاربرد دارد [1, 4, 20, 21]. همچنین از المان تیر تیموشنکو (B31) برای تیرهای سقف استفاده شده است. در تمامی تحلیل های این مقاله، مطالعه همگرایی اندازه مش های محاسباتی به دقت صورت پذیرفته است؛ بر این اساس در جهت ارتفاعی از اندازه مش ۰/۱ متر و در جهت پیرامونی از اندازه مش برابر با ۰/۱۵ متر استفاده شده است.

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 کم و بیش برابری با نمونه سیلوی لاغر داشته باشند. این سیلوها تحت بار تخلیه آیین نامه اروپا [9] با فرض محتویات گندم، منطبق بر روش آنالیز کامپیوتری غیرخطی آیین نامه اروپا [11]، طراحی و کنترل شده اند. همچنین رفتار کمانشی آن ها تحت بار باد و ترکیب بار باد و تخلیه آیین نامه اروپا [9, 12, 16] نیز در پژوهش پیشین نویسندگان [1] بررسی شده است.

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	25.0	10	2.5
$1.0 < h_c/d_c < 2.0$	Intermediate slender	19.4	12	1.6
$h_c/d_c \leq 1.0$	Squat	13.7	15	0.9

Table 1- Geometric characteristics of steel silos.

شکل ۱. نمای شماتیک از سیلوهای مورد مطالعه.

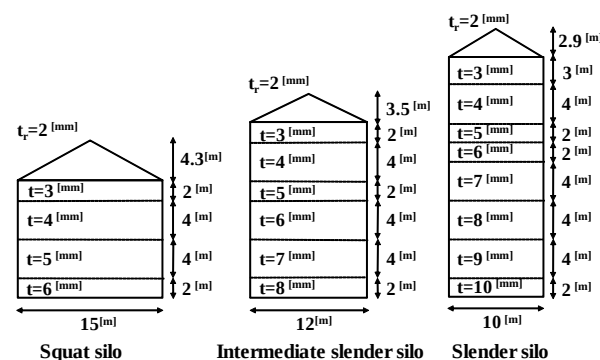


Fig. 1. Schematic view of silos under consideration.

نمونه سیلوهای مطالعه شده همگی پُر بوده و ارتفاع سطح معادل دانه ها از پای سیلو با h_c در جدول (۱) نشان داده شده است. به علاوه در هر سیلو سقفی مخروطی دارای قاب، با ضخامت ورق (t_r) ۲ میلی متری و زاویه شیب ۳۰ درجه نسبت به افق، تغییر شکل های مرز بالایی سازه را کنترل می نماید. شکل (۱) به صورت شماتیک، سیلوها و تغییرات ضخامت باریکه های^{۱۲} سازنده جداره هر یک را نشان می دهد.

فولادهای نرمه با سطح صاف و فولادهای نرمه دچار فرسودگی، نمونه‌ای برای سه دسته D1، D2 و D3 هستند. سطوح دسته D4 سطوحی نامتعارف مانند جداره‌های موجدار افقی را شامل می‌شود. با توجه به اینکه نمونه سیلوهای ورق صاف در این پژوهش بررسی می‌شوند، سه دسته بندی اولیه مورد نظر قرار دارد.

برای تعیین فشار تخلیه در سیلوه‌ها، آیین‌نامه اروپا [9] حد پایین و حد بالایی را برای ضریب اصطکاک جداره پیشنهاد می‌نماید که به ترتیب منجر به بیشینه شدن فشار نرمال و بیشینه شدن ترکشن اصطکاکی دیواره سیلوه می‌شود. در حالت اول ضریب اصطکاک از طریق $\mu = \mu_m / a_\mu$ و در حالت دوم با استفاده از $\mu = a_\mu \mu_m$ بدست می‌آید. ضریبی است که آیین‌نامه برای تعیین حد پایین و بالای مقدار ضریب اصطکاک جداره معرفی می‌نماید. همچنین زیروند m مقدار میانگین کمیت را نشان می‌دهد. آیین‌نامه اروپا [9] مقادیر مختلف لازم برای تعیین فشار محتویات را برای مواد دانه‌ای مرسوم ارائه کرده است. در این پژوهش با فرض محتویات گندم و با در نظرگیری سه سطح جداره D1، D2 و D3، مقادیر ضریب اصطکاک جداره بین $0/2$ تا $0/6$ متغیر در نظر گرفته شده است؛ بدین ترتیب اثر این ضریب بر نتایج کماتشی سیلوه‌ها ارزیابی می‌شود. همچنین در تحلیل‌های انجام شده در این مقاله، طبق ضوابط آیین‌نامه، از حد بالای وزن مخصوص گندم (γ_u) و همچنین حد بالای نسبت فشار جانبی مطابق رابطه $K = a_k K_m$ استفاده شده است (a_k ضریب نسبت فشار جانبی است). مقادیر متناظر مربوط به محتویات (گندم) در جدول (۲) آورده شده است. لازم به اشاره است که کلیات نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام گرفته در این مطالعه، به نوع محتویات مفروض (گندم) حساس نیست.

جدول ۲. مشخصات گندم محتوی سیلوه‌ها.

γ_u [kN/m ³]	ϕ_r [°]	K_m	a_k	μ_m (D1)	μ_m (D2)	μ_m (D3)	a_μ
9.0	34	0.54	1.11	0.24	0.38	0.57	1.16

Table 2. Properties of the ensiled wheat.

در مدل‌سازی جداره و سقف سیلوه‌ها، 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) $2/1 \times 10^5$ مگاپاسکال، نسبت بواسون (ν) $0/3$ و چگالی (ρ) ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب است.

۲-۳- بارگذاری تخلیه در سیلوه‌ها

طبق آیین‌نامه اروپا [9]، عوامل عمده تعیین‌کننده بارگذاری تخلیه در سیلوه‌ها عبارتند از: نسبت ابعادی سازه، کلاس ارزیابی اثر^{۱۴} (AAC)، میزان خروج از مرکزی توده محتویات در بارگیری e_f و میزان خروج از مرکزی دهانه تخلیه e_0 ، نوع سیلو (جداره نازک $d/t > 200$ و جداره ضخیم $d/t < 200$)، ضریب اصطکاک جداره و شکل سطح مقطع سیلو (دایروی و غیر دایروی^{۱۵}). علاوه بر موارد یاد شده، نوع مصالح ذخیره‌شده نیز از موارد کلیدی در تعیین بارگذاری سازه است.

براساس آیین‌نامه، با توجه به ظرفیت سیلوه‌ها که حدود ۲۰۰۰ تن است و فرض بارگیری و تخلیه مرکزی در سیلوه‌ها (میزان خروج از مرکزی در بارگیری و تخلیه سیلوه‌ها، e_f و e_0 برابر با صفر است)، هر سه سیلوی مطالعه شده در کلاس ارزیابی اثر دو (AAC2) قرار می‌گیرند. سه کلاس‌بندی مختلف آیین‌نامه، سطوح سخت‌گیری در طرح سیلوه‌ها 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.

یادآوری می‌شود که در این مطالعه، توجه اصلی معطوف به بررسی اثر ضریب اصطکاک جداره است. در این خصوص آیین‌نامه اروپا [9]، چهار دسته مختلف D1 تا D4 را برای وضعیت سطح جداره داخلی سیلوه‌ها مشخص می‌نماید. D1، D2 و D3 به ترتیب نماینده سطوحی با اصطکاک کم، متوسط و زیاد هستند. فولادهای ضد زنگ سردنورد،

14 Action Assessment Class (AAC)

15 Non-circular

در روابط فوق، $p_{hf}(y)$ فشار نرمال و $p_{wf}(y)$ ترکشن اصطکاکی ناشی از فرآیند بارگیری برحسب متغیر y است که در شکل (۲) مشخص شده است. همچنین A و U به ترتیب سطح مقطع سیلو و محیط داخلی مقطع سیلو هستند. γ ، K و μ به ترتیب مقادیر مشخصه وزن مخصوص، نسبت فشار جانبی و ضریب اصطکاک جداری هستند. آیین‌نامه در تبدیل فشار بارگیری به تخلیه، از ضریب تخلیه^{۱۸} مربوط به فشار نرمال C_h و ترکشن اصطکاکی C_w با مقادیر $1/15$ و $1/10$ در کلاس ارزیابی اثر دو (AAC2) استفاده می‌نماید.

۲-۳-۲- سیلوهای میانی و کوتاه

در تعیین فشارهای تخلیه در سیلوهای میانی و کوتاه، آیین‌نامه اروپا [9] از توزیع فشار رایمبرت اصلاح‌شده^{۱۹} با فرمول‌بندی زیر استفاده می‌نماید:

$$p_{hf}(y) = p_{ho} Y_R(y) \quad (۸)$$

$$p_{wf}(y) = \mu p_{hf}(y) \quad (۹)$$

$$Y_R(y) = (1 - \{(\frac{y - h_o}{y_o - h_o}) + 1\}^n) \quad (۱۰)$$

$$n = -(1 + \tan \phi_r)(1 - h_o / y_o) \quad (۱۱)$$

$$h_o = \frac{r}{3} \tan \phi_r \quad (۱۲)$$

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^{۲۰} یا زاویه انباشت توده دانه‌ها مطابق جدول (۲) است. آیین‌نامه در تبدیل فشار بارگیری به تخلیه در سیلوهای میانی و کوتاه نیز از رابطه ۶ و ۷ استفاده می‌نماید؛ با این تفاوت که ضریب تخلیه مربوط به فشار نرمال C_h و ترکشن اصطکاکی C_w ، هر دو، برای سیلوی کوتاه برابر واحد بوده (فشار بارگیری و تخلیه یکسان است) و برای سیلوی میانی به صورت زیر بر حسب ضریب تعدیل لاغری^{۲۱} C_s محاسبه می‌شود:

فشار وارد بر دیواره استوانه‌ای سیلوها از دو جزء اصلی تشکیل شده است: قسمت ثابت که بار متقارن نامیده شده و یک قسمت آزاد که اصطلاحاً پچ‌لود^{۱۶} نامیده شده و آثار کوچک عدم تقارن حین فرآیند تخلیه در سیلوها را پوشش می‌دهد. با توجه به اینکه آثار پچ‌لود بر مقاومت کمانشی سیلوهای فولادی ناچیز ارزیابی شد [22]؛ در بارگذاری‌های این مقاله تنها قسمت متقارن فشار تخلیه در نظر گرفته شده است. در ادامه بارگذاری‌های انجام گرفته بر سیلوها تشریح می‌شود.

۲-۳-۱- سیلوی لاغر

آیین‌نامه اروپا [9] برای تعیین فشار ناشی از محتویات دانه‌ای در سیلوهای لاغر، از توزیع فشار جَنسن^{۱۷} استفاده می‌کند. بر این اساس مقادیر فشار نرمال (p_{he}) و ترکشن اصطکاکی (p_{we}) در فرآیند تخلیه، از روابط زیر بدست می‌آید:

$$p_{hf}(y) = p_{ho} Y_J(y) \quad (۱)$$

$$p_{wf}(y) = \mu p_{hf}(y) \quad (۲)$$

$$p_{ho} = \gamma K y_o \quad (۳)$$

$$y_o = \frac{1}{K \mu U} A \quad (۴)$$

$$Y_J(y) = 1 - e^{-y/y_o} \quad (۵)$$

$$p_{he} = C_h p_{hf} \quad (۶)$$

$$p_{we} = C_w p_{wf} \quad (۷)$$

شکل ۲. توزیع فشارهای متقارن تخلیه بر یک نمونه سیلوی لاغر.

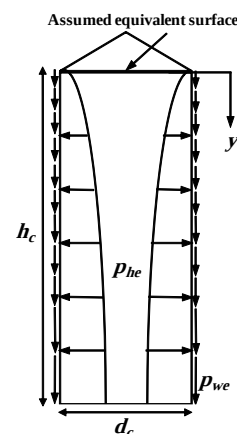


Fig. 2. Symmetrical discharge pressures in a sample slender silo.

18 Discharge factor

19 Modified Reimbert

20 Angle of repose

21 Slenderness adjustment factor

16 Patch load

17 Janssen

سیلوی فولادی مورد نظر برای درستی‌آزمایی عبارتند از: ارتفاع ۱۸ متر، قطر ۶ متر، با تغییرات ضخامت جداره در ترازهای ارتفاعی ۳/۸ متر، ۷ متر و ۹/۸ متر از ۶ به ۵ میلیمتر، از ۵ به ۴ میلیمتر و از ۴ به ۳ میلیمتر. همچنین فولاد مصرفی دارای مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگاپاسکال، نسبت پواسون ۰/۳ و رفتار الاستوپلاستیک با تنش تسلیم ۲۵۰ مگاپاسکال است. پای سیلو مفصلی مدل شده است و سقفی پوسته‌ای با شیب ۱۵ درجه برای مرز بالایی سازه در نظر گرفته شده است. نمونه سیلو تحت بار تخلیه متقارن ناشی از گندم با فرض دیواره از نوع D2 قرار گرفته است (به مشخصات ارائه شده در جدول (۲) مراجعه شود).

جدول (۳) به مقایسه نتایج متناظر بدست آمده در این مطالعه با مقاله سادوسکی و روتر [8] می‌پردازد. بر این اساس، هماهنگی مناسبی بین نتایج دو مطالعه برقرار شده است.

جدول ۳. مقایسه نتایج تحلیل‌های کمانشی سادوسکی و روتر [8] با این پژوهش.

Analysis type	Discharge load factor (λ), Sadowski and Rotter [8]	Discharge load factor (λ), Present study	Error%
LBA	7.87	7.52	≈ 4.4
GMNA	4.75	4.50	≈ 5.3

Table 3- Comparison of buckling results obtained by Sadowski and Rotter [8] with those of present study.

۳- یافته‌ها و تفسیر نتایج

۳-۱- رفتار کمانشی سیلوه‌ها تحت فشار تخلیه

سه نمونه سیلوی مورد نظر این مطالعه، طبق توزیع فشار تخلیه آیین‌نامه اروپا [9] در شکل (۳) بارگذاری شدند. سپس مقاومت کمانشی سیلوه‌ها بر اساس ضریب‌بار پایداری λ که برابر با نسبتی از بار وارد بر سازه پیش از وقوع خرابی کمانشی در آن است، محاسبه شد. در این رابطه، دو نوع تحلیل خطی LBA و تحلیل غیرخطی GMNA صورت پذیرفته است. هرچند ملاک محاسبات آتی، نتایج حاصل از تحلیل GMNA (با استفاده از الگوریتم ریکس^{۲۳}) است و

$$C_h = 1.0 + 0.15 C_s \quad (13)$$

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

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

فشارهای نرمال و ترکشن اصطکاکی وارد بر جداره سیلوه‌ها بر حسب مقادیر مختلف ضریب اصطکاک جداره، با فرض محتویات گندم جدول (۲) محاسبه و در شکل (۳) نشان داده شده است. در این شکل محور قائم مقادیر عمق محتویات از سطح معادل دانه‌ها است که نسبت به ارتفاع هر سیلو نرمال شده است.

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

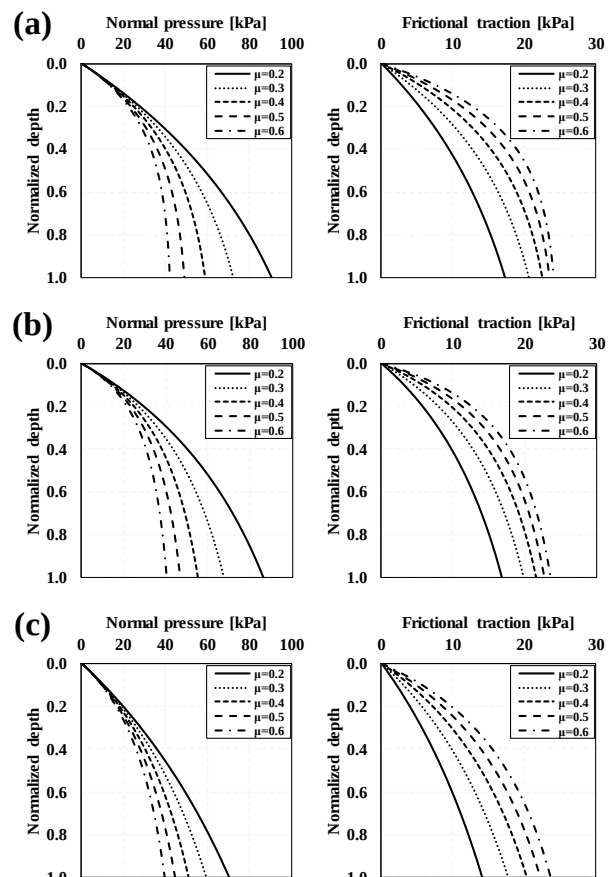


Fig. 3. Discharge pressures imposed on: (a) slender, (b) intermediate slender and (c) squat silo.

۴-۲- درستی‌آزمایی مدل‌ها

به منظور درستی‌آزمایی روش تحلیل خطی و غیرخطی انجام گرفته در این پژوهش، نتایج مقاومت کمانشی مقاله سادوسکی و روتر [8] مقایسه شده است. مشخصات نمونه

22 Stability load factor

23 Riks

بر این جدول، برخلاف آنچه تحت بار باد در سیلوها مشاهده می‌شود [1]، نتایج تحلیل LBA بسیار بزرگتر از نتایج مقاومت حاصل از تحلیل‌های GMNA است. در نتیجه در نظرگیری آثار غیرخطی هندسی و مصالح در تحلیل‌های کمانشی تحت بار تخلیه ضروری است. همچنین بر اساس نتایج ارائه شده و مستقل از نسبت ابعادی سیلوها، با افزایش در مقدار ضریب اصطکاک جداری، ضریب بار تحلیل LBA به شکل پیوسته کاهش می‌یابد. حال آن‌که در نظر گرفتن آثار غیرخطی هندسی و مصالح در قالب تحلیل GMNA، منجر به کاهش قابل توجه اثر این ضریب بر نتایج مقاومت کمانشی می‌شود.

جدول ۴- ضرایب بار پایداری سیلوها.

μ	Slender silo		Intermediate slender silo		Squat silo	
	λ_{LBA}	λ_{GMNA}	λ_{LBA}	λ_{GMNA}	λ_{LBA}	λ_{GMNA}
0.2	10.042	3.444	7.531	2.678	6.864	2.215
0.3	7.731	3.393	5.916	2.760	5.140	2.255
0.4	6.610	3.271	5.129	2.806	4.292	2.258
0.5	5.958	3.251	4.642	2.779	3.759	2.215
0.6	5.541	3.179	4.336	2.754	3.416	2.189

Table 4- Stability load factors of the silos.

در رابطه با سیلوی لاغر با افزایش در مقدار μ کاهش ملایم در مقادیر ضریب بار کمانشی مشاهده می‌شود. اما در سیلوهای میانی و کوتاه، تا مقدار $\mu=0.4$ کاهش و پس از آن افزایش در مقادیر ضریب بار رخ می‌دهد. بنابراین اثر افزایش ضریب اصطکاک جداری برای مقاومت کمانشی سیلوها می‌تواند افزایش یا کاهش باشد. همچنین حساسیت سیلوی لاغر به تغییرات ضریب اصطکاک جداری بیشتر از سیلوهای کوتاه و میانی است (حداکثر تفاوت در λ_{GMNA} به ازای مقادیر مختلف μ به ترتیب برابر با ۸٪، ۵٪ و ۳٪ برای سیلوهای لاغر، میانی و کوتاه است).

نمودارهای غیرخطی بار-جابجایی تحلیل‌های GMNA نیز در شکل (۵) نمایش داده شده است. محور قائم، ضریب-بار و محور افقی، جابه‌جایی قائم رأس سقف هر سیلو را نشان می‌دهد. برای هر سیلو، دو نمودار متناظر با کمینه و بیشینه ضریب اصطکاک جداری مفروض در پژوهش ترسیم شده است.

تحلیل LBA، طبق آیین‌نامه اروپا [11]، برای اطمینان از شناسایی صحیح نقطه دو شاخگی یا بایفرکیشن^{۲۴} در مسیر غیرخطی بار-جابجایی سازه‌ها انجام شده است (کنترل شرط $\lambda_{GMNA} \leq \lambda_{LBA}$).

مد کمانشی نمونه سیلوها تحت بارگذاری تخلیه در شکل (۴) نمایش داده شده است. تحلیل خطی LBA، مد کمانشی فشار محوری متقارن الاستیک^{۲۵} که باریک‌های پایینی سیلوها را متأثر می‌سازد، نشان می‌دهد. این درحالی است که تحلیل GMNA مد کمانش الاستیک-پلاستیک پافیلی متقارن^{۲۶}، تحت ترکیب کشش پیرامونی و فشار محوری را در پای سیلوها پیش‌بینی می‌نماید. همچنین لازم به اشاره است که برای تمامی ضرایب اصطکاک جداری مفروض، شکل مد کمانشی یکسانی بدست آمده است.

شکل ۴. فرم کمانش یافته خطی و غیرخطی نمونه سیلوی: (الف) لاغر، (ب) میانی و (ج) کوتاه.

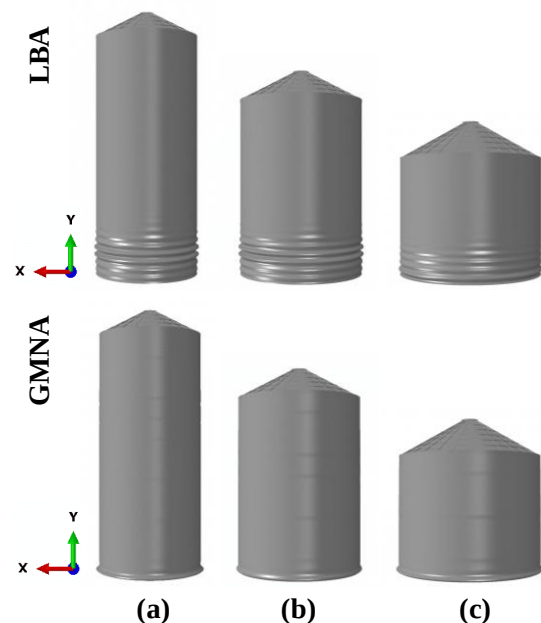


Fig. 4. Linear and non-linear buckled forms of: (a) slender, (b) intermediate slender and (c) squat silo.

جدول (۴) ضرایب بار حاصل از تحلیل‌های خطی و غیرخطی را برای هر یک از سیلوها خلاصه می‌نماید. منطبق

24 Bifurcation

25 Elastic axisymmetric axial compression buckling mode

26 Symmetrical elastic-plastic elephant's foot buckling mode

شکل ۵. نمودارهای غیرخطی بار-جابجایی محوری نمونه سیلوی: (الف) لاغر، (ب) میانی و (ج) کوتاه.

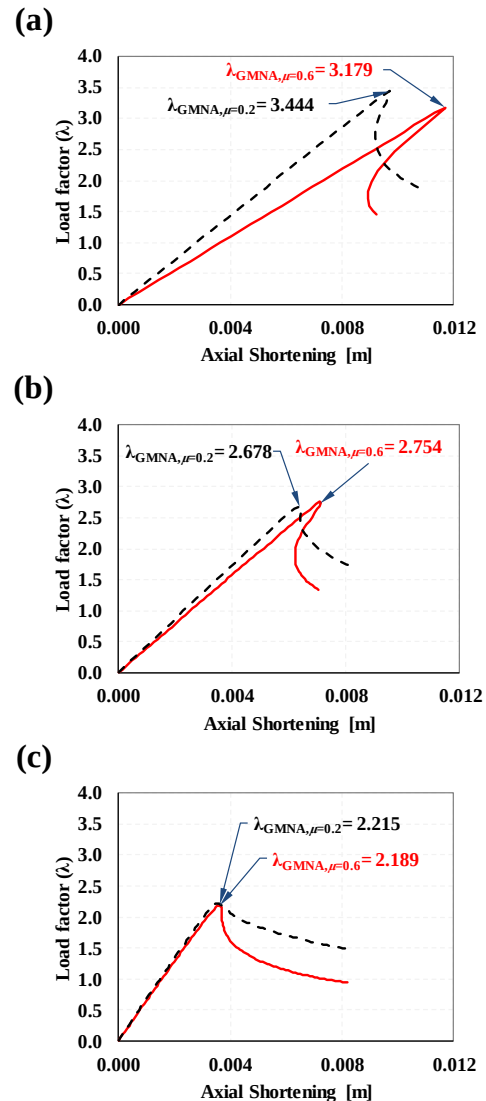


Fig. 5. Non-linear load-axial displacement curves of: (a) slender, (b) intermediate slender and (c) squat silo.

تحلیل غیرخطی، برای $\mu_{max}=0/6$ نقطه دوشاخگی را در مسیر تعادل هر سه سیلو پیش‌بینی می‌نماید که با کاهش ناگهانی در تراز مقاومت ادامه می‌یابد. برای $\mu_{min}=0/2$ نیز همان فرم مسیر تعادل حاصل می‌شود؛ با این تفاوت که مسیر پس‌کمانش^{۲۷} با شیب ملایم‌تری کاهش می‌یابد. همچنین شیب اولیه مسیرهای غیرخطی به ازای μ_{min} کمی بیشتر از μ_{max} است؛ هر چند این تفاوت با کاهش نسبت ابعادی سازه‌ها کاهش یافته است.

نظر به نتایج تحلیل‌های غیرخطی در قالب مدهای کمانشی حاصل، مقادیر ضریب بار محاسبه شده و نمودارهای غیرخطی بار-جابجایی استخراج شده، اثر ضریب اصطکاک جداری در رفتار و مقاومت کمانشی سیلوه‌ها تحت بار تخلیه آیین‌نامه اروپا [9]، کم و حاشیه‌ای ارزیابی می‌شود.

در واقع دو عامل فشار محوری و فشار داخلی در تعیین مقاومت کمانشی پافیلی سیلوه‌ها دخیل هستند که این امر تنها در تحلیل GMNA دیده می‌شود [19]. بدین ترتیب اگرچه با افزایش در ضریب اصطکاک جداری، مقدار فشار محوری افزایش می‌یابد، ولی این امر به کاهش در فشار داخلی دیواره سیلوه‌ها نیز منجر می‌شود (شکل ۳). با این وصف افزایش در ضریب اصطکاک جداری، الزاماً باعث تسریع کمانش در پای سیلوه‌ها نمی‌شود. روابط پیشنهادی آیین‌نامه اروپا [11, 12] در تعیین مقاومت کمانشی پوسته‌ها در حضور همزمان فشار محوری و داخلی، در قسمت بعد ارائه می‌شود.

۳-۲- ارزیابی روش تنش آیین‌نامه اروپا

به طور عمومی، فشار داخلی بر مقاومت کمانشی سیلوه‌ها اثری مثبت دارد و می‌تواند آثار نقص هندسی^{۲۸} را تا حد زیادی کاهش دهد. اما از طرفی، وجود فشار داخلی زیاد کمانش ارتجاعی را به تعویق انداخته و منجر به جاری شدن موضعی در پای سیلو و ایجاد تغییرشکل‌های پلاستیک می‌شود. این امر با کاهش مقاومت کمانشی و رخداد کمانش پافیلی همراه است [18]. آیین‌نامه اروپا [11, 12] بر اساس رابطه پیشنهادی روتر [23] و با کمی تغییرات، به ارائه رابطه‌ای برای تخمین بار بحرانی کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای تحت فشار همزمان محوری و داخلی (با فرض شرایط مفصلی در پای سیلوه‌ها) می‌پردازد. در ادامه ضمن معرفی روش طرح تنش آیین‌نامه، کفایت این رابطه در تخمین مقاومت کمانشی پافیلی نمونه سیلوه‌های مطالعه شده، ارزیابی می‌شود.

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

۰/۲ است [11]. همچنین λ_p حد پلاستیک لاغری نسبی، طبق رابطه ۲۲ است:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\alpha_{pp}}{1-\beta}} \quad (22)$$

α_{pp} نیز ضریب کاهش نقص تحت فشار پلاستیک^{۲۹} است که پس از پیشنهاد روتر [23] به صورت رابطه ۲۳ در آیین‌نامه اروپا استفاده شده است:

$$\alpha_{pp} = \left\{ 1 - \left(\frac{\bar{p}_g}{\lambda_x} \right)^2 \right\} \left[1 - \frac{1}{1.12 + s^{3/2}} \right] \left[\frac{s^2 + 1.21\lambda_x}{s(s+1)} \right] \quad (23)$$

$\bar{p}_g = \frac{p_g}{\sigma_{x,Rcr}} \cdot \frac{r}{t}$ and $s = \left(\frac{1}{400} \right) \left(\frac{r}{t} \right)$
در رابطه بالا p_g بزرگ‌ترین مقدار موضعی فشار داخلی طرح است که با توجه به فشار نرمال جداره سیلو حین تخلیه، تعیین می‌شود.

به منظور کنترل کفایت روابط پیشنهادی آیین‌نامه در تخمین مقاومت کمانشی پافیلی سیلوها، مقدار $\sigma_{x,Rd}$ برای هر سیلو با استفاده از روابط بالا در تراز λ_{GMNA} محاسبه شد و مقادیر متناظر در جدول (۵) خلاصه شده است. همچنین مطابق شکل (۶)، مقدار $\sigma_{x,Ed}$ نیز با استفاده از تحلیل الاستیک خطی پوسته‌ها^{۳۰} (LA) در تراز λ_{GMNA} محاسبه شده است [11].

جدول ۵. مقادیر تنش طراحی و مقاومت طراحی تنش غشایی محوری در تراز λ_{GMNA}

$\sigma_{x,Rd}$ [MPa]				$\sigma_{x,Ed}$ [MPa]			$\sigma_{x,Ed}/\sigma_{x,Rd}$		
μ	Sl ¹	Int ²	Sq ³	Sl ¹	Int ²	Sq ³	Sl ¹	Int ²	Sq ³
0.2	84	58	30	90	63	36	1.08	1.09	1.18
0.3	102	76	43	114	82	49	1.12	1.08	1.14
0.4	110	87	52	127	95	58	1.15	1.10	1.12
0.5	114	93	59	138	103	65	1.21	1.10	1.11
0.6	116	97	63	145	108	70	1.25	1.11	1.11

¹: Slender silo; ²: Intermediate slender silo; and ³: Squat silo.

Table 5- Design values and design resistances of meridional membrane stress σ_x at λ_{GMNA} .

با توجه به اینکه مقادیر تنش در بار کمانشی بدست آمده است، لازم است کسر معرفی شده در رابطه ۱۶ عددی بزرگ-

$$\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \leq 1.0 \quad (16)$$

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. مقدار مقاومت طرح، به شکل زیر قابل محاسبه است:

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

در رابطه ۱۷ 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 (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 (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:

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

همچنین پارامتر بی‌بعد طول اومگا ($\omega=l/\sqrt{rt}$)، طول قطعه مورد نظر از پوسته را توصیف می‌نماید که در آن کمانش رخ داده است؛ و در هر سه سازه این مطالعه، l طول باریکه پای هر سیلو به طول ۲ متر است. مقادیر r و t نیز در شکل (۱) نشان داده شده است.

حال پس از تعیین لاغری نسبی (λ_x)، مقدار ضریب کاهش کمانشی (χ_x) از رابطه ۲۱ بدست می‌آید:

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

در رابطه بالا β ضریب بازه پلاستیک با مقدار توصیه شده برابر با ۰/۶، η توان رابطه اندرکنش با مقدار توصیه شده برابر با ۱/۰ و λ_0 حد فشردگی لاغری نسبی با مقدار پیشنهاد شده

29 Plastic pressurised imperfection reduction factor

30 Linear elastic shell analysis (LA)

میانی و لاغر تحت فشار تخلیه مرکزی آیین‌نامه اروپا [9] قرار گرفتند. در تعیین فشار وارد بر جداره سیلوها، ضریب اصطکاک جداری بین ۰/۲ تا ۰/۶ متغیر در نظر گرفته شد. علاوه بر انجام تحلیل‌های خطی و غیرخطی برای ارزیابی اثر این ضریب، کفایت روابط آیین‌نامه اروپا [11, 12] در تخمین مقاومت کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای تحت فشار محوری همراه با فشار داخلی نیز بررسی شد. جمع‌بندی زیر بر اساس یافته‌های این مطالعه قابل ارائه است:

در هر سه سیلو و مستقل از مقدار ضریب اصطکاک جداری، تحلیل LBA، مُد کمانش فشار محوری متقارن الاستیک و تحلیل GMNA، مُد کمانش الاستیک-پلاستیک پافیلی را در نزدیکی پای سازه نشان می‌دهند. نمودارهای غیرخطی بار-جابجایی سیلوها نیز در لحظه کمانش، نقطه دوشاخگی را در مسیر تعادل هر سازه نمایش می‌دهند.

با افزایش در مقدار ضریب اصطکاک جداری، ضریب بار تحلیل LBA به‌طور پیوسته کاهش می‌یابد. این درحالی است که نتایج مقاومت کمانشی تحلیل‌های GMNA، حساسیت کمی نسبت به تغییرات این ضریب دارند.

اگرچه با افزایش در ضریب اصطکاک جداری، نتایج تحلیل خطی LBA به نتایج تحلیل غیرخطی GMNA نزدیک می‌شود؛ اما همچنان روش تحلیل خطی، مقاومت کمانشی سیلوها را بسیار بزرگ‌تر پیش‌بینی می‌نماید. بنابراین در نظرگیری آثار غیرخطی هندسی و مصالح در تحلیل‌های کمانشی تحت بار تخلیه ضروری است.

در واقع دو عامل فشار محوری و فشار داخلی در تعیین مقاومت کمانشی پافیلی سیلوها دخیل هستند که این امر تنها در تحلیل GMNA دیده می‌شود [19]. بدین ترتیب اگرچه با افزایش در ضریب اصطکاک جداری، مقدار فشار محوری افزایش می‌یابد، ولی این امر به کاهش در فشار داخلی دیواره سیلوها نیز منجر می‌شود. با این وصف افزایش در ضریب اصطکاک جداری، الزاماً به تسریع کمانش در پای سیلوها نمی‌انجامد.

حساسیت سیلوی لاغر به تغییرات ضریب اصطکاک جداری بیشتر از سیلوهای کوتاه و میانی است. بیشینه تفاوت در λ_{GMNA} به ازای مقادیر مختلف μ به ترتیب برابر با ۵٪، ۸٪،

تر از یک حاصل دهد تا نشان دهنده تشخیص صحیح رخداد کمانش در سیلوها باشد. با توجه به این توضیح و نتایج ارائه شده در جدول (۵)، روابط آیین‌نامه در تمامی حالات، بدرستی کمانش پافیلی در سیلوها را پیش‌بینی کرده است. همچنین مقادیر حاصل از کسر رابطه ۱۶ به یک نزدیک بوده که بیانگر دقت مناسب روش آیین‌نامه، بدون محافظه‌کاری زیاد است. بنابراین در محدوده مدل‌سازی‌های این مطالعه، روابط آیین‌نامه عملکردی رضایت‌بخش دارند.

شکل ۶. توزیع تنش غشایی محوری تحلیل LA در تراز λ_{GMNA} در باریکه پایینی نمونه سیلوی: (الف) لاغر، (ب) میانی و (ج) کوتاه بر حسب پاسکال برای μ_{min}

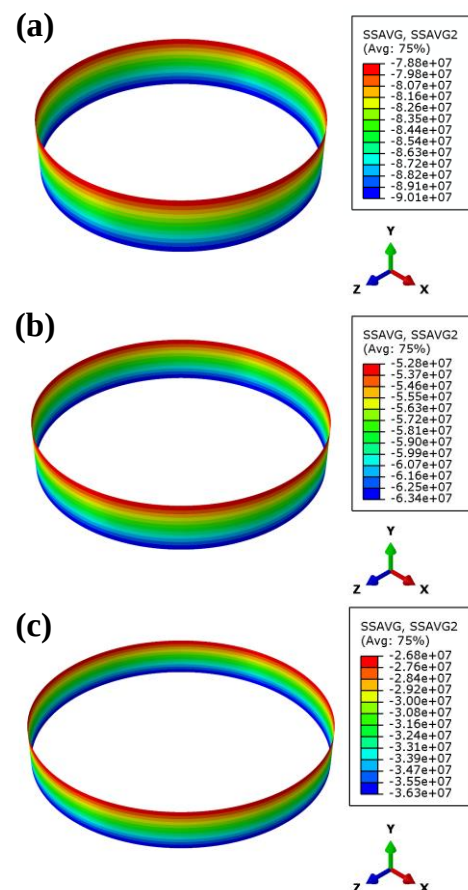


Fig. 6. Meridional membrane stress distributions of LA analyses at λ_{GMNA} in the base strake of : (a) slender, (b) intermediate slender and (c) squat silo in [Pa] for μ_{min} .

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر ضریب اصطکاک جداری بر مقاومت و رفتار کمانشی سیلوهای ورق صاف فولادی در فرآیند تخلیه بررسی شد. بدین منظور سه نمونه سیلوی جداره متغیر کوتاه،

- [9] EN 1991-4. 2006 Eurocode 1: Actions on structures - Part 4: Silos and tanks. Brussels: CEN.
- [10] 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.
- [11] EN 1993-1-6. 2007 Eurocode 3: Design of 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] Sadowski A. J., Rotter J. M. 2011 Buckling of very slender metal silos under eccentric discharge. *Engineering Structures*, 33, 1187–1194.
- [14] Zhao Y., Cao Q., Su L. 2013 Buckling design of large circular steel silos subject to wind pressure. *Thin-Walled Structures*, 73, 337–349.
- [15] 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.
- [16] EN 1991-1-4. 2005 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions. Brussels: CEN.
- [17] Dassault Systèmes Simulia. 2012 Abaqus CAE User's Manual.
- [18] Rotter J. M. 2004 Cylindrical shells under axial compression. In: Teng J. G., Rotter J. M., editors. *Buckling of Thin Metal Shells*, London: Spon Press, 42–87.
- [19] Rotter J. M. 2006 Elephant's foot buckling in pressurised cylindrical shells. *Stahlbau*, 75, 742–747.
- [20] 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.
- [21] Song C. Y. 2004 Effects of patch loads on structural behavior of circular flat-bottomed steel silos. *Thin-Walled Structures*, 42, 1519–1542.
- [22] Mehrehtehran 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.
- [23] Rotter J. M. 1990 Local collapse of axially compressed pressurized thin steel cylinders. *Journal of Structural Engineering*, 116, 1955–1970.

و ۳٪ برای سیلوهای لاغر، میانی و کوتاه است. با این وجود، اثر ضریب اصطکاک جداری بر نتایج مقاومت کمانشی سیلوها تحت فشار تخلیه، بسیار اندک ارزیابی می‌شود.

در مقایسه با نتایج تحلیل‌های عددی، روابط آیین‌نامه اروپا [11, 12] در تخمین مقاومت کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای تحت فشار محوری همراه با فشار داخلی (تخمین مقاومت کمانشی پافیلی)، نسبت مقاومت طراحی ($\sigma_{x,Ed}/\sigma_{x,Rd}$) در تراز (λ_{GMNA}) را بین ۸٪ تا ۲۵٪ درجهت اطمینان پیش‌بینی کرده است و در نتیجه عملکرد مناسبی دارد.

References

۵- مراجع

- [1] Maleki S., Mehrehtehran A. M. 2019 3D wind buckling analysis of steel silos with stepped walls. *Thin-Walled Structures*, 142, 236–261.
- [2] Maleki S., Mehrehtehran A. M. 2018 3D wind buckling analysis of long steel corrugated silos with vertical stiffeners. *Engineering Failure Analysis*, 90, 156–167.
- [3] Cao Q. S., Zhao Y., Zhang R. 2018 Wind induced buckling of large circular steel silos with various slenderness. *Thin-Walled Structures*, 130, 101–113.
- [4] 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.
- [5] Cao Q., Zhao Y. 2018 Buckling design of large eccentrically filled steel silos. *Powder Technology*, 327, 476–488.
- [6] Sadowski A. J., Rotter J. M. 2012 Buckling in eccentrically discharged silos and the assumed pressure distribution. *Journal of Engineering Mechanics*, 139, 858–867.
- [7] Sadowski A. J., Rotter J. M. 2012 Slender thin cylindrical shells under unsymmetrical strip loads. *Thin-Walled Structures*, 61, 169–179.
- [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.

Investigation into the effect of wall friction coefficient on discharge buckling capacity of steel flat sheet silos

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@student.sharif.edu

Abstract:

Thin-walled cylindrical steel silos are one of the major storage structures in most of industrial and agricultural sectors. There are different load cases that should be considered in design of silos, such as, filling and discharge loads, wind load, seismic load and thermal loads. 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 considered for structural design of silos. Considering small wall thickness of steel silos, they are susceptible to buckling failure. Under discharge pressures, high meridional (axial) compression and internal pressure form at the base of silos that can lead to elastic-plastic elephant's foot buckling mode. Therefore, it is deemed as the main buckling failure mode under discharge loads of silos.

The wall friction coefficient of silos mainly depends on the wall surface characteristic and type of the ensiled material. This coefficient is a key variable in determination of magnitude and distribution of discharge pressures. To assess the effect of this variable on buckling capacity of steel silos, three example silos with different aspect ratios were considered. Each silo was loaded by the concentric discharge pressures in accordance to Eurocode. Subsequently, 3D linear and non-linear buckling analyses (i.e., LBA and GMNA analyses, respectively) were performed for different amounts of wall friction coefficient that varied between 0.2 and 0.6.

Considering the results obtained, LBA analyses predicted an elastic axial compression buckling mode in the upper edge of base strake, where there is a change in shell wall thickness. Also, an elastic-plastic elephant's foot buckling mode at the base strake of each silo was predicted by the GMNA analyses. Moreover, the load-path curves of example silos extracted from the GMNA analyses showed a bifurcation buckling that was followed by a dramatic reduction in post-buckling resistance. This held true for all three silos and all different values of wall friction coefficient considered in this study.

The discharge buckling resistances estimated by the LBA were up to three times larger than those predicted by the GMNA. Therefore, including non-linearity in discharge buckling assessment of silos is urgently required. The effect of wall friction coefficient on buckling capacities of steel silos was significant for the LBA analyses that governed by axial compression. However, the elephant's foot buckling mode observed under discharge load is affected by the both axial and internal pressures. As a result, adopting more sophisticated analyzing procedure that includes geometrically and materially non-linearity in the calculations (i.e., GMNA analyses) showed quite marginal effects for this coefficient (with the maximum difference of 8% in buckling capacity).

As an extra investigation, the Eurocode provisions on stress design of steel silos under meridional compression with coexistent of internal pressure have also been examined. Eurocode recommends a reduction in critical axial buckling stress due to accompanying internal pressure, in terms of the plastic pressurised imperfection reduction factor α_{pp} . As compared with the finite element results, for all the cases considered in this paper, the critical axial membrane stress calculated with respect to the Eurocode provisions yielded satisfactory predictions.

Keywords: Steel cylindrical silos, Buckling, Eurocode, Discharge pressure, Abaqus