

ارزیابی کمانشی سیلوهای استوانه‌ای فولادی تحت بار باد

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

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

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

*a.moazezi@student.sharif.edu

تاریخ پذیرش: [۹۷/۱۲/۲۲]

تاریخ دریافت: [۹۷/۱/۲۰]

چکیده

سیلوهای استوانه‌ای فولادی به دلیل ضخامت کم جداره، مستعد خرابی کمانشی هستند. در حالت خالی و یا وجود سطح پایینی از محتویات، سیلوها در معرض کمانش تحت بار باد قرار می‌گیرند. سیلوهای فولادی به دو شکل مرسوم ورق صاف و ورق موجدار دیده می‌شوند. به منظور افزایش ظرفیت باربری، ممکن است از سخت‌کننده‌های قائم و محیطی در طرح آن‌ها استفاده شود. این مقاله به مطالعه عددی پایداری سه نمونه سیلوی ورق صاف فولادی، بدون سخت‌کننده، تحت بار باد می‌پردازد. سیلوهای مورد بررسی، دارای نسبت ابعادی (ارتفاع به قطر) متفاوت بوده و ضخامت جداره آن‌ها در ارتفاع متغیر است. هر یک از سیلوها طبق روش پایداری پوسته‌ها، مطابق با آیین‌نامه اروپا و برای ذخیره‌سازی گندم طرح شده‌اند. بار باد نیز هماهنگ بر توزیع فشار توصیه شده در آیین‌نامه اروپا، در هر دو جهت ارتفاعی و پیرامونی بر سازه‌ها اعمال شده است. در جهت پیرامونی، آیین‌نامه دو توزیع فشار متفاوت، یکی در حالت سیلوی منفرد و دیگری برای سیلوی مستقر در گروه سیلوها ارائه می‌نماید. اثر هر دو توزیع فشار از طریق تحلیل‌های خطی و غیرخطی ارزیابی شده است. همچنین، اثر وجود بازشو بر روی سقف سیلوها برای تهیه، طبق اضافه فشار آیین‌نامه مورد ملاحظه قرار گرفته است. بر این اساس، از سیلویی با سقف بسته در مقایسه با همان سیلو با سقف دارای بازشو و تحت بار باد آیین‌نامه اروپا، می‌توان انتظار متوسط ۴۰٪ مقاومت کمانشی بیشتر داشت. نتیجه اخیر در مورد سیلوی منفرد و هم سیلوی مستقر در گروه سیلوها برقرار است.

واژگان کلیدی: سیلوی استوانه‌ای فولادی، کمانش، آیین‌نامه اروپا، بار باد، نرم‌افزار آباکوس

۱- مقدمه

تأمین مواد خام اولیه، وجود دارد. سازه سیلو در وهله نخست تحت بارهای ناشی از بارگیری و تخلیه قرار دارد. بسته به شرایط و موقعیت مکانی، انواع دیگر بار، از قبیل بار باد، بار

سیلوها که در اصل مخازن ذخیره مواد دانه‌ای هستند، از جمله سازه‌های کلیدی در بسیاری از صنایع و کارخانجات هست. شکل‌های متفاوتی از این سازه در جای‌جای زنجیره

تانک‌ها است [19]. همچنین، معمولاً نسبت ابعادی تانک‌ها در عمل کوچک‌تر از سیلوها است. در واقع طیف متنوع‌تری از نسبت ابعادی در سیلوها دیده می‌شود. از این رو این مقاله سه سیلو متفاوت، یک سیلوی کوتاه^۳، یک سیلوی میانی^۴ و یک سیلو لاغر^۵ را مطابق با دسته‌بندی آیین‌نامه اروپا [1] ارزیابی می‌نماید. در قیاس با مقاومت کمانشی سیلوها در برابر بار یکنواخت خارجی، روابط طراحی کمتری برای بار باد (که شکل غیریکنواخت دارد) ارائه شده است. در برخی موارد نیز با در نظرگیری سازه‌هایی با ضخامت ثابت جداره، مسئله‌ی ساده‌تری مطالعه شده است [9].

در زمینه بررسی عددی ظرفیت کمانشی سیلوهای ورق صاف فولادی، چندین پژوهش وجود دارد. آنسوریان [20] رفتار کمانشی سیلوها و تانک‌های لاغر را مطالعه نمود. وی به ارائه رابطه ساده طراحی در این زمینه، با در نظرگیری آثار نقص^۶، شرایط مرزی و فرم توزیع فشار باد پرداخت. همچنین به مزیت استفاده از تحلیل المان محدود، در آنالیزهای انجام گرفته اشاره داشت. گریز و درلر [21] به بررسی کاهش مقاومت کمانشی سیلوها و تانک‌ها با در نظرگیری شش فرم مختلف از نقص هندسی پرداختند. آن‌ها اثر حاد^۷ نقص هندسی اولیه به شکل مُد کمانشی^۸ را بر پایداری سیلوهای کوتاه مشاهده نمودند. آن‌ها همچنین آثار پلاستیسته در باربری کمانشی سیلوهای جداره نازک با نسبت شعاع به ضخامت برابر ۵۰۰ و ۲۰۰ را به ترتیب بسیار کم و متوسط ارزیابی کردند. چن و روتر [22] به بررسی پایداری مخازن استوانه‌ای با ضخامت ثابت و ارائه روابطی برای تخمین فشار ایستایی بحرانی^۸ باد به وسیله تحلیل خطی و غیرخطی پرداختند.

در جدیدترین پژوهش در این حیطه، ژا^۹ و همکاران [23] به مطالعه ظرفیت کمانشی کلی سیلوهای ورق صاف کوتاه‌قد، تحت ترکیب بار باد به علاوه سیلوی خالی و باد بعلاوه سیلوی پُر، مطابق با آیین‌نامه اروپا پرداختند. در نمونه سیلوی

لرزه‌ای، بار برف، بارهای حرارتی، بار ناشی از انفجار گازهای مجتمع شده از محتویات، در طرح آن مطرح است [1].

دو شکل عمده سیلوهای استوانه‌ای فولادی، نوع ورق صاف و ورق موجدار است. امکان استفاده از سخت‌کننده‌های قائم و محیطی در هر دو نوع وجود دارد؛ چنانکه سیلوهای ورق موجدار، به‌طور مرسوم توسط سخت‌کننده‌های قائم تقویت می‌گردند.

مخازن دانه‌ای جداره نازک در چرخه واقعی کار خود، در معرض بارگذاری‌های نامتقارن قرار می‌گیرند. بارگیری و تخلیه با خروج از مرکزیت [2-5]، گرادیان حرارتی ایجاد شده در اثر تابش نور خورشید بر یک طرف سیلوها [6] و اثر موضعی فشار محوری ملحقات سازه همچون نردبان‌ها و راهروهای دسترسی به سازه [7]، نمونه‌هایی از بارهای نامتقارن وارده بر سیلوها است. به علاوه، توزیع فشار باد بر سازه‌های استوانه‌ای نیز کاملاً نامتقارن است [8, 9]. مورد اخیر در خصوص سیلوهای خالی و یا با سطح پایینی از محتویات، می‌تواند طراحی ضخامت جداره سازه، به ویژه در نواحی میانی و بالایی دیواره را کنترل نماید. تعیین رفتار پوسته‌ها تحت بارهای پیچیده وارد شده در بیشتر موارد، خارج از توانایی حل تحلیلی بوده است و از این رو روش‌های حل عددی و استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود موضوعیت می‌یابد [10, 11]. این رویه توسط آیین‌نامه اروپا نیز پی‌گرفته شده است [12].

چندین آزمایش تونل باد برای تعیین فشار باد وارد شده بر سیلوها با نسبت ابعادی (ارتفاع به قطر) متفاوت انجام شده است [13-17]. بر اساس مطالعات تجربی، آیین‌نامه اروپا [18] به ارائه توزیع فشار ناشی از بار باد بر سیلوهای منفرد^۱ و سیلوی مستقر در گروه سیلوها^۲ می‌پردازد. هر دو توزیع فشار پیشنهادی این آیین‌نامه در مطالعات عددی مقاله حاضر بر سازه اعمال شده است.

با وجود شباهت‌هایی که به لحاظ سازه‌ای بین سیلوها و تانک‌ها (مخازن ذخیره مایعات) وجود دارد؛ عدم قطعیت در بارگذاری و ضرایب ایمنی طرح سیلوها، بسیار بیشتر از

^۳ squat

^۴ intermediate slender

^۵ slender

^۶ imperfection

^۷ eigenmode

^۸ critical stagnation pressure

^۱ isolated silo

^۲ silo in a group

تحلیل می‌شود. ابعاد به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که حجم سیلوه‌ها نزدیک به یکدیگر باشند (جدول ۱). فرض می‌شود که باریکه‌های^{۱۳} سازنده سیلوه‌ها از طریق جوش در کنار یکدیگر قرار گرفته و ارتفاع هر یک نیز ۲ متر است. سقف مشابهی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر و با شیب ۱۵ درجه نسبت به افق در هر سیلو، مانع از تغییر شکل‌های خارج از حالت گرد^{۱۴} مرز بالایی سیلو می‌شود [3, 4, 25]. شکل (۱) به صورت شماتیک، سیلوه‌ها و تغییرات ضخامت باریکه‌های سازنده جداره هر یک را نشان می‌دهد. کفایت طراحی سیلوه‌های مورد مطالعه، از طریق تحلیل غیرخطی تحت بار تخلیه، در نرم‌افزار آباکوس/استاندارد [26] بررسی و کنترل شده است. لازم به اشاره است که امکان انتخاب چیدمان‌های دیگری نیز برای میزان ضخامت و چگونگی تغییرات ارتفاعی آن در سیلوه‌ها وجود دارد.

جدول ۱. مشخصات هندسی سیلوه‌ها.

Aspect ratio range	Silo slenderness category	Height (H) [m]	Diameter (D) [m]	aspect ratio (H/D)	Storage volume [m ³]
H/D ≥ 2.0	Slender	25	10	2.5	1963.5
1.0 < H/D < 2.0	Intermediate slender	18	12	1.5	2035.8
H/D ≤ 1.0	Squat	12	15	0.8	2120.6

Table 1. Geometric characteristics of steel silos.

شکل ۱. نمای شماتیک از سیلوه‌های مورد مطالعه.

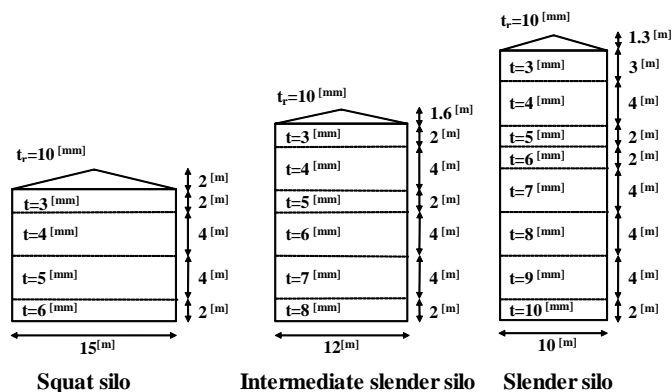


Fig. 1. Schematic view of silos under consideration.

مورد مطالعه آن‌ها، ترکیب بار باد بعلاوه سیلوی پُر، ظرفیت کمانشی کمتری را حاصل داد. آن‌ها همچنین آثار پارامترهای مختلفی چون نسبت ابعادی، نسبت شعاع به ضخامت، اثر بازشو در دیواره سیلو، محل اعمال پچ‌لود^۹ (اضافه فشار موضعی که آثار بارگیری و تخلیه با خروج از مرکزی را در نظر می‌گیرد)، اثر ضخامت ثابت و متغیر دیواره را در مقاومت کمانشی سیلوه‌ها ارزیابی کردند.

در این مقاله، با استفاده از تحلیل المان محدود، سعی بر تبیین رفتار کمانشی سیلوه‌های ورق صاف فولادی تحت بار باد است. بدین منظور سه سیلو با نسبت ابعادی متفاوت و با ضخامت متغیر جداره، تحت بار تخلیه^{۱۰} (سیلوی محتوی گندم) طرح شد. بارگذاری باد که برگرفته از آیین‌نامه اروپا [18, 24] است، تغییرات ارتفاعی و پیرامونی فشار را در نظر گرفته است. با انجام تحلیل‌های خطی و غیرخطی کمانشی، مقاومت سیلوه‌ها در برابر بار باد آیین‌نامه تحت توزیع فشار پیشنهادی (برای الف) سیلوی منفرد، ب) سیلوی مستقر در گروه سیلوه‌ها در دو حالت با سقف بسته^{۱۱} و سیلو با سقف دارای بازشو جهت تهویه^{۱۲} محاسبه و مقایسه شده است. این رو نوآوری‌های پژوهش عبارتند از:

- ۱- مطالعه پایداری سه سیلو تحت بار باد آیین‌نامه اروپا، با در نظرگیری تغییرات ارتفاعی و پیرامونی فشار باد.
- ۲- بررسی اثر توزیع فشار باد پیشنهادی آیین‌نامه، برای سیلوی منفرد و سیلوی مستقر در گروه سیلوه‌ها و ارائه مقادیر بحرانی فشار و سرعت باد در هر مورد.
- ۳- تبیین اثر اضافه فشار بار باد آیین‌نامه در مورد سیلوه‌های سقف دارای بازشو برای تهویه.

۲- مدل‌های عددی

۲-۱- سیلوه‌های مورد مطالعه

به‌منظور پوشش نسبت‌های ابعادی عملی و در عین حال مطابق با دسته‌بندی انجام گرفته در آیین‌نامه اروپا [1]، یک سیلوی کوتاه، یک سیلوی میانی و یک سیلو لاغر در این مقاله

^{۱۳} strakes

^{۱۴} out-of-round displacements

^۹ patch load

^{۱۰} discharge load

^{۱۱} closed roof

^{۱۲} vented silo with a small opening

است. با توجه به تقارن مسئله، تنها نیمی از هر سازه مدل شده است. پای سیلوها از نوع مفصلی در نظر گرفته شده است و شرایط مرزی تقارن نیز در محل صفحه تقارن مدل‌ها اعمال شده است.

جداره و سقف سازه هر دو به وسیله المان پوسته ۴ گره‌ای دابل انحنای^{۲۳} (S4R) ساخته شده است. این نوع المان، اجازة تغییر شکل‌های برشی و چرخش‌های بزرگ را می‌دهد. المان S4R در کمانش پوسته‌های ضخیم و نازک کاربرد دارد - [27 - 29] و در پژوهش پیشین مؤلفان در کمانش سیلوها تحت بار باد با موفقیت به‌کار گرفته شده است [30]. در تمامی تحلیل‌های مقاله حاضر، مطالعه همگرایی اندازه مش‌های محاسباتی به‌دقت صورت پذیرفته است؛ بر این اساس در جهت ارتفاعی و پیرامونی، اندازه مش‌ها برابر با ۰/۱ متر انتخاب شد.

در مدل‌سازی جداره و سقف سیلوها، رفتار الاستوپلاستیک بدون سخت‌شوندگی با مقاومت جاری شدن ۲۵۰ مگاپاسکال برای فولاد در نظر گرفته شده است. همچنین برای فولاد مصرفی، مقادیر مدول الاستیسیته^{۲۴} $2/1 \times 10^5$ مگاپاسکال، نسبت پواسون^{۲۵} ۰/۳ و چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب است.

۲-۳- بارگذاری باد

مخازن استوانه‌ای تحت بار باد، فشاری رو به داخل (فشار با علامت جبری مثبت) بر سطح رو به باد تجربه می‌کنند که اصطلاحاً به محل اثر آن، ناحیه ایستا^{۲۴}، اطلاق می‌شود. سایر بخش‌های استوانه در وضعیت مکش^{۲۵} قرار می‌گیرند. فشار باد بر مخازن استوانه‌ای از جمله سیلوها، توزیعی دو جهته دارد، یکی در راستای ارتفاعی و دیگری در جهت پیرامونی. تنها تعداد محدودی از مطالعات در این حیطه آثار تغییرات ارتفاعی باد را در تحلیل‌های خود لحاظ نموده‌اند [30, 31] و سایرین از آن چشم‌پوشی نموده‌اند. در این مقاله، بارگذاری فشار باد بر روی جداره استوانه‌ای سیلوها اثر می‌کند و سقف سازه‌ها بارگذاری نشده است. روابط زیر که برگرفته از آیین-

سیلوها با فرض پُر بودن کامل مخزن و سطح صاف محتویات دانه‌ای، با استفاده از پارامترهای پیشنهادی آیین‌نامه اروپا [1] برای گندم، در برابر بار تخلیه (معرفی شده در همان آیین‌نامه) طرح شده‌اند. در این راستا، تحلیل خطی بایفرکیشن^{۱۵} (LBA)، تحلیل غیرخطی از نظر هندسی و مدل‌سازی مواد^{۱۶} (GMNA) و تحلیل غیرخطی از نظر هندسی و مدل‌سازی مواد با در نظرگیری نقص هندسی^{۱۷} (GMNIA) به فرم مُد اول کمانش، انجام گرفت. دامنه نقص هندسی در راستای ارتفاعی، برای سیلوهایی با کیفیت کلاس ساخت^{۱۸} «ب» یا همان کیفیت بالا^{۱۹}، به کمک روابط موجود در آیین‌نامه اروپا در کمانش پوسته‌ها [12] در نظر گرفته شده است.

به‌منظور صرفه‌جویی در حجم مقاله، خلاصه نتایج در جدول (۲) آورده شده است. بر این اساس، هر سه سیلو تحت بار تخلیه، مقاومت کمانشی تقریباً نزدیکی دارند. از طرفی، ضریب بار^{۲۰} (λ) تحلیل GMNIA مربوط به هر سازه، از مقدار ضریب ایمنی کلی ($\gamma=1/1.65$) که از حاصل ضرب ضریب ایمنی جزئی مقاومت برای پایداری^{۲۱} ($\gamma_{MI}=1/1$) [18] و ضریب ایمنی جزئی برای بارهای سازه‌ای نامطلوب^{۲۲} ($\gamma_F=1/1.5$) [1] بدست می‌آید، بزرگتر است.

جدول ۲. خلاصه نتایج ضریب بار سیلوها تحت بار تخلیه.

Analysis type	Slender silo	Intermediate slender silo	Squat silo
LBA	5.49	5.82	5.68
GMNA	2.98	3.28	3.08
GMNIA	2.45	1.85	1.81

Table 2. Summary of load factors for silos under discharge load.

۲-۲- مدل‌سازی المان محدود

مدل‌سازی‌ها و تحلیل‌های انجام گرفته در طول مقاله، تماماً به‌وسیله نرم‌افزار آباکوس/استاندارد [26] صورت پذیرفته

^{۱۵} Linear elastic bifurcation analysis

^{۱۶} Geometrically and materially non-linear analysis

^{۱۷} Geometrically and materially non-linear analysis with imperfections

^{۱۸} fabrication quality class

^{۱۹} high quality

^{۲۰} load factor

^{۲۱} resistance partial safety factor for stability

^{۲۲} partial safety factor for unfavorable structural actions

^{۲۳} doubly curved

^{۲۴} stagnation zone

^{۲۵} suction

$$\begin{cases} I_v(z) = \frac{k_I}{c_o(z) \cdot \ln(z/z_0)} & z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \\ I_v(z) = I_v(z_{\min}) & z \leq z_{\min} \end{cases} \quad (6)$$

همچنین شدت آشفتگی^{۳۵} در ارتفاع z است و از طریق رابطه (۶) تعریف می‌شود. k_I نیز ضریب آشفتگی^{۳۶} با مقدار توصیه شده برابر با یک است.

رابطه (۷) و رابطه (۸) به ترتیب توزیع فشار پیرامونی سیلوی منفرد و سیلوی مستقر در گروه سیلوها را برای سیلوهایی با سقف بسته نشان می‌دهد. توزیع ارتفاعی و پیرامونی فشار باد در شکل (۲) نشان داده شده است.

شکل ۲. توزیع ارتفاعی و پیرامونی فشار باد بر سیلوها با سقف بسته.

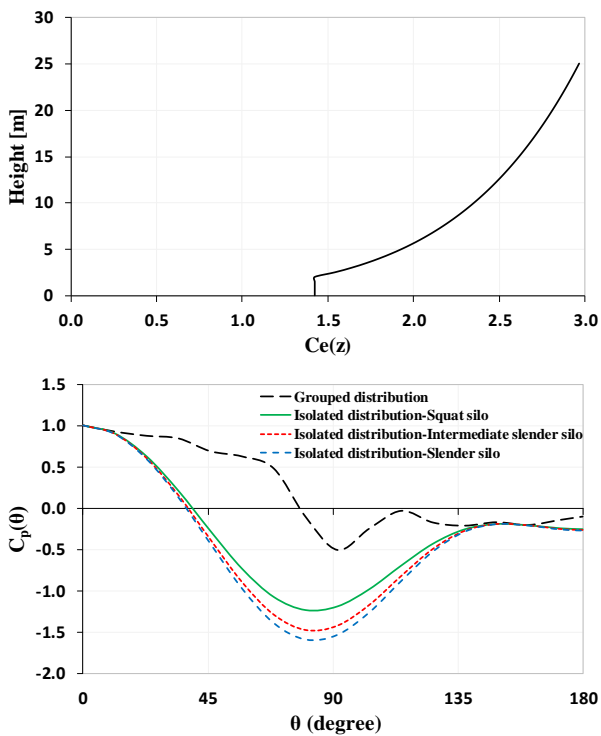


Fig. 2. Meridional and circumferential wind pressure distributions on silos with closed roof.

$$\begin{aligned} C_{p, Isolated}(\theta) = & -0.54 + 0.16(D/H) + \\ & \{0.28 + 0.04(D/H)\} \cos \theta + \\ & \{1.04 - 0.20(D/H)\} \cos 2\theta + \\ & \{0.36 - 0.05(D/H)\} \cos 3\theta - \\ & \{0.14 - 0.05(D/H)\} \cos 4\theta \end{aligned} \quad (V)$$

^{۳۵} turbulence intensity

^{۳۶} turbulence factor

نامه اروپا [18, 24] است، به تشریح بارگذاری باد در مقاله می‌پردازد. در جهت ارتفاعی:

$$q_p(z) = C_e(z) \cdot q_b \quad (1)$$

$$q_b = \frac{1}{2} \rho \cdot v_b^2 \quad (2)$$

رابطه (۱) به معرفی فشار بیشینه سرعت^{۳۶} $q_p(z)$ در ارتفاع z می‌پردازد. در رابطه (۲)، q_b فشار سرعت پایه^{۳۷}، ρ چگالی هوا (مقدار ۱/۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب در آیین‌نامه برای آن توصیه شده است)، v_b سرعت باد پایه^{۳۸} است که به‌عنوان تابعی از جهت وزش و زمان سال، در ارتفاع ۱۰ متری بالای سطح زمین و برای زمین نوع^{۳۹} (مطابق آیین‌نامه اروپا) تعریف می‌شود. نواحی با پوشش گیاهی کوتاه و موانع منفرد همچون درختان و ساختمان‌ها با فاصله حداقل ۲۰ برابر ارتفاع موانع از یکدیگر، زمین نوع ۲ خوانده می‌شود.

$$C_e(z) = [1 + 7I_v(z)] \cdot c_r^2(z) \cdot c_o^2(z) \quad (3)$$

$$\begin{cases} c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) & z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \\ c_r(z) = c_r(z_{\min}) & z \leq z_{\min} \end{cases} \quad (4)$$

$$k_r = 0.19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0.07} \quad (5)$$

در رابطه (۳-۵) $C_e(z)$ ضریب معرض^{۳۰} و $C_o(z)$ ضریب آروگرافی^{۳۱} است که با فرض نواحی تقریباً مسطح، برابر با یک در نظر گرفته می‌شود؛ z_0 طول زبری^{۳۲}، k_r ضریب زمین^{۳۳} بوده که وابسته به طول زبری است و از رابطه (۵) محاسبه می‌شود. در این مقاله، محاسبات بار باد، با فرض زمین نوع ۲ انجام شده است. بر این اساس، $z_0 = z_{0,II}$ و برابر ۰/۰۵ متر، z_{\min} و z_{\max} به ترتیب برابر با ۲ و ۲۰۰ متر است. ضریب زبری^{۳۴} $c_r(z)$ در رابطه (۴)، اثر تغییرات در سرعت متوسط باد در محل سازه را در نظر می‌گیرد.

^{۳۶} peak velocity pressure

^{۳۷} basic velocity pressure

^{۳۸} basic wind velocity

^{۳۹} terrain category II

^{۳۰} exposure factor

^{۳۱} orography factor

^{۳۲} roughness length

^{۳۳} terrain factor

^{۳۴} roughness factor

به ضخامت برابر با ۵۰۰، مدول الاستیسیته 2×10^5 مگاپاسکال و نسبت پواسون $0/3$ و رفتار الاستوپلاستیک بدون سخت-شوندگی با مقاومت جاری شدن ۲۵۰ مگاپاسکال برای فولاد آن. پای مخزن نیز مفصلی مدل شده است. بارگذاری فشار باد در ارتفاع مخزن ثابت فرض شده است و از رابطه (۱۰) بدست می‌آید:

$$P(\theta) = C_p(\theta) \cdot q_w \quad (10)$$

چن و روتر [22] به گزارش مقادیر q_w (که در واقع همان فشار سرعت پایه، q_b است) پرداختند. آن‌ها بارگذاری سیلوی منفرد را مطالعه نموده بودند و به همین جهت مقدار $C_p(\theta)$ از رابطه ۷ و با جایگزینی نسبت قطر به ارتفاع متناظر، به صورت رابطه ۱۱ بدست می‌آید:

$$C_p(\theta) = -0.4333 + 0.3067 \cdot \cos \theta + 0.9067 \cdot \cos 2\theta + 0.3267 \cdot \cos 3\theta - 0.1067 \cdot \cos 4\theta \quad (11)$$

جدول (۳) به مقایسه نتایج بدست آمده از تحلیل خطی بایفرکیشن (LBA)، تحلیل غیرخطی از نظر هندسی (GNA^{۳۸}) و تحلیل غیرخطی از نظر هندسی و مدل‌سازی مواد (GMNA) در این مطالعه، با آنچه توسط چن و روتر [22] گزارش شده است، می‌پردازد. همان‌گونه که از برابری نتایج تحلیل‌های GNA و GMNA برمی‌آید، هیچ‌گونه اثری از تأثیر پلاستیسیته در کمانش تحت باد برای مخزن مورد نظر دیده نشده است و اساساً کمانش در محدوده الاستیک است. همچنین میزان خطا تحلیل‌های خطی و غیرخطی، کمتر از ۱ درصد بدست آمده است.

جدول ۳. مقایسه نتایج تحلیل‌های چن و روتر [22] با پژوهش حاضر.

Analysis type	q_w [N/m ²]- Chen & Rotter [22]	q_w [N/m ²]- Present study	Error%
LBA	20443	20233	≈ 1
GNA	20238	20041	≈ 1
GMNA	20238	20041	≈ 1

Table 3- Comparison of the results obtained by Chen & Rotter [22] with those of present study.

$$C_{p, Grouped}(\theta) = +0.20 + 0.60 \cos \theta + 0.27 \cos 2\theta - 0.05 \cos 3\theta - 0.13 \cos 4\theta + 0.13 \cos 5\theta - 0.09 \cos 8\theta + 0.07 \cos 10\theta \quad (8)$$

در روابط بالا، θ محور پیرامونی است و از سمت روبه باد، از محل صفحه تقارن به درجه اندازه‌گیری می‌شود. D قطر استوانه و H نیز ارتفاع کلی قسمت استوانه‌ای را مشخص می‌نماید. بدین ترتیب فشار نهایی وارده بر سیلوها به صورت رابطه (۹) ارائه می‌شود:

$$P(z, \theta) = q_p(z) \cdot C_p(\theta) \cdot c_s \cdot c_d = C_e(z) \cdot C_p(\theta) \cdot q_b \quad (9)$$

در رابطه فوق، $C_s C_d$ ضریب سازه^{۳۷} است و اثر عدم وقوع همزمان بیشینه فشار باد بر روی سطح C_s و اثر نوسان سازه در اثر آشفتگی C_d روی بار باد را لحاظ می‌نماید. برای دودکش‌های با سطح مقطع دایره‌ای که ارتفاعی کمتر از ۶۰ متر و $6/5$ برابر قطر دارند، مقدار ضریب سازه، طبق آیین‌نامه اروپا [24] می‌تواند یک در نظر گرفته شود. همین مقدار در بارگذاری سیلوها استفاده شده است. نتایج مقاله بر حسب فشار سرعت پایه (q_b) ارائه شده است که به سادگی قابل تبدیل به سرعت باد پایه (v_b) است.

بر اساس توضیح آیین‌نامه اروپا [18] در بحث توزیع پیرامونی فشار باد، در صورتی که سیلو در سقف دارای بازشو برای تهویه باشد، فشار اضافی داخلی ΔC_p برابر با $+0/4$ باید در نظر گرفته شود. در این پژوهش تأثیر مورد اخیر روی مقاومت کمانشی سیلوها به صورت جداگانه، در هر دو حالت سیلوی منفرد و سیلوی مستقر در گروه سیلوها، در نظر گرفته شده است.

۲-۴- درستی آزمایشی مدل‌ها

به منظور درستی‌آزمایی روش تحلیل خطی و غیرخطی انجام گرفته در این مقاله، نتایج مقاله چن و روتر [22] در کمانش پوسته‌های استوانه تحت بار باد، مورد مقایسه قرار گرفته است. مشخصات نمونه مخزن فولادی مورد مقایسه عبارت است از: نسبت ارتفاع به شعاع برابر با ۳، نسبت شعاع

در روابط فوق، l برابر با ارتفاع استوانه، r شعاع آن و مقدار پارامتر گودی $U_{0\theta}$ ، برای کیفیت کلاس ساخت «ب» یا همان کیفیت بالا، برابر 0.1 در نظر گرفته شده است. نمودارهای ترسیم شده در شکل (۴)، هماهنگی بسیار بالایی را بین نتایج دو مقاله نشان می‌دهند.

۳- یافته‌ها و تفسیر نتایج

۳-۱- کماتش تحت باد سیلوهای با سقف بسته

در این قسمت با اعمال توزیع پیرامونی فشار برای سیلوی منفرد و سیلوی مستقر در گروه سیلوها، رفتار کماتشی این سازه‌ها با فرض وجود سقف بسته، بررسی می‌شود. با استفاده از تحلیل LBA مقدار ویژه و مُد کماتشی متناظر در هر سیلو به دست می‌آید. سپس با لحاظ کردن آثار غیرخطی هندسی و مدل‌سازی مواد، با دنبال کردن رفتار کماتشی افزایشی^{۴۰} سازه از طریق الگوریتم ریکس^{۴۱}، مقدار بار بحرانی مشخص می‌شود. شکل کماتش یافته سیلوها، حاصل از تحلیل غیرخطی GMNA نیز در کنار مُد کماتش خطی LBA نمایش داده شده و مقایسه می‌شود. لازم به اشاره است که، با توجه به اندازه تنش‌های ایجاد شده در سازه‌ها در قیاس با معیار جاری شدن ون‌میسز^{۴۲}، عملاً کماتش در حد الاستیک رخ می‌دهد (شکل‌های ۴ و ۵). پس نتایج تحلیل GMNA و GNA یکسان است. نکته اخیر تحت تمامی حالات بارگذاری و در رابطه با هر سه سیلو مورد مطالعه، به دلیل اندازه ضخامت جداره آن‌ها برقرار است.

جدول (۴) نتایج تحلیل خطی و غیرخطی در بارگذاری مربوط به سیلوی منفرد، را خلاصه می‌نماید. بر این اساس مقادیر به دست آمده در بار کماتشی از هر دو تحلیل نزدیک به یکدیگر هستند؛ از این رو، آثار غیرخطی هندسی در این حالت از بارگذاری قابل چشم‌پوشی است.

در مقایسه مُدهای کماتشی شکل (۴)، مُد کماتش خطی در هر سه سیلو به شکل فرورفتگی و برآمدگی موضعی در سمت روبه باد بروز یافته است. بیشینه تغییرشکل در باریکه‌های بالایی سازنده سیلوها که ضخامت کمتری دارند، رخ داده

همچنین برای درستی آزمایشی مسیرهای غیرخطی بار در مقابل جابه‌جایی ارائه شده در مقاله، نمودارهای تحلیل GMNA به‌ازای مقادیر مختلف دامنه نقص اولیه، با پژوهش چن و روتر [22] مورد مقایسه قرار گرفته است (شکل ۳).

در اعمال نقص اولیه به سازه، از فرم مُد اول کماتشی استفاده شده است. به کمک روابط موجود در آیین‌نامه اروپا در کماتش پوسته‌ها [12] و با توجه به فرم نقص انتخاب‌شده، دامنه نقص اولیه مطابق با دامنه گودی^{۳۹} $\Delta w_{0\theta}$ جداره مخزن از روابط (۱۲-۱۴) تعیین می‌شود:

شکل ۳. نمودارهای بار-جابه‌جایی پوسته استوانه‌ای فولادی با نقص هندسی به شکل مُد کماتشی خطی، مطالعه حاضر در قیاس با مطالعه چن و روتر [22].

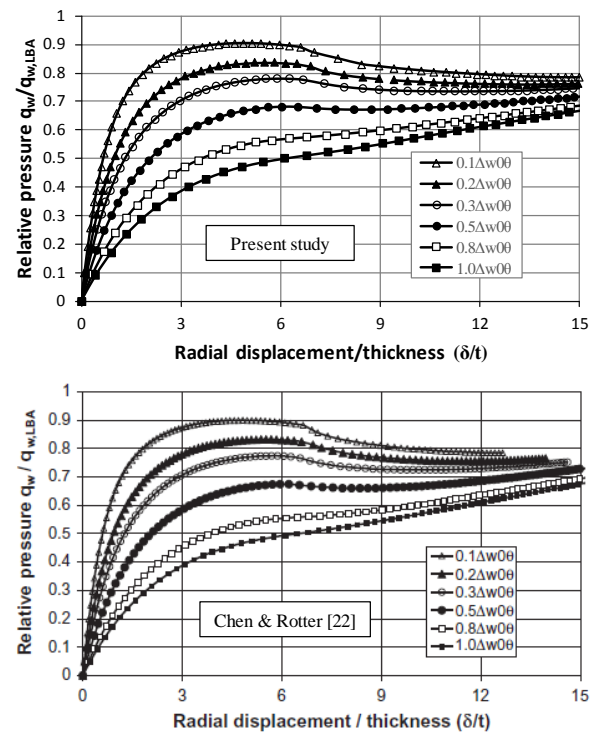


Fig. 3. Load-Displacement curves of the steel cylindrical shell with a linear eigenmode imperfection, Present study vs. Chen & Rotter [22] study.

$$U_{0\theta} = \Delta w_{0\theta} / l_{g\theta} \quad (12)$$

$$l_{g\theta} = 2.3 (l/r)^{1/2} (t/r)^{1/4} r, \text{ but } l_{g\theta} \leq r \quad (13)$$

$$U_{0\theta} \leq U_{0,max} \text{ Class B : } U_{0,max} = 0.01 \quad (14)$$

۴۰ incremental buckling behavior

۴۱ Riks

۴۲ von Mises yield criterion

۳۹ dimple amplitude

مشابه و بسته به نوع بارگذاری، آثار غیرخطی هندسی و میزان کاهش در مقاومت تخمینی آن، کاملاً متفاوت است.

شکل ۴: فرم کمانش یافته خطی (با جابه‌جایی نرمال‌شده) و غیرخطی

سیلوها تحت حالت بار سیلوی منفرد با توزیع تنش ون‌میسز به پاسکال.

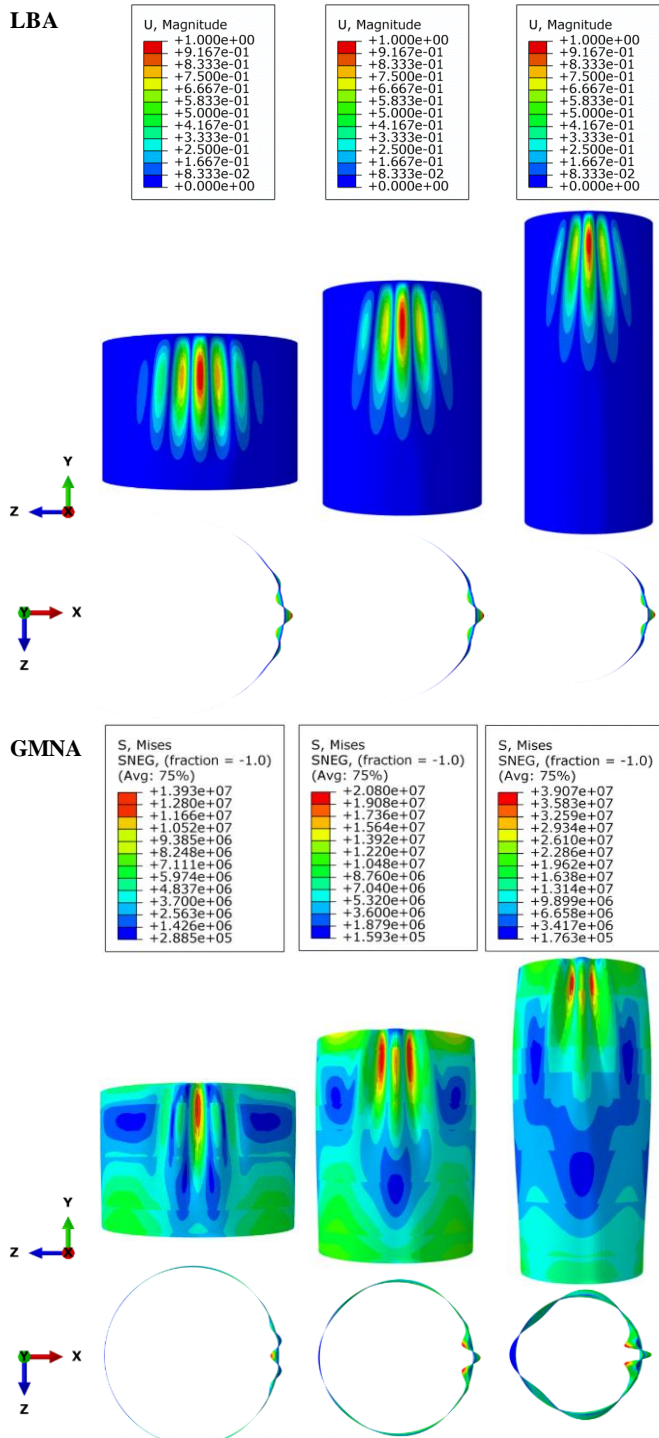


Fig. 4. Linear (with normalized displacements) and non-linear buckled form of silos under isolated load case with von Mises stress distribution in Pa.

است. در هر سه سیلو، گسترش نیم‌موج^{۴۳} اصلی کمانشی در جهت ارتفاعی سیلوها، طول تقریباً برابری دارد.

جدول ۴: خلاصه نتایج مقاومت کمانشی در برابر باد سیلوهای با سقف بسته، تحت حالت بار سیلوی منفرد.

Analysis type	Parameter	Slender silo	Intermediate slender silo	Squat silo
LBA	q_b [N/m ²]	697.26	762.81	651.10
	v_b [m/s]	33.40	34.94	32.28
GMNA	q_b [N/m ²]	682.36	759.78	648.17
	v_b [m/s]	33.04	34.87	32.20

Table 4- Summary of wind buckling resistance under isolated load case for silos with closed roof.

شکل کمانش یافته سیلوها در تحلیل غیرخطی نیز حاکی از تمرکز تغییرشکل‌ها در ترازهای بالایی ارتفاع و در سمت روبه باد است. همچنین در مقایسه با مُد خطی کمانش، نیم‌موج‌های پیرامونی با اندازه‌های غیریکنواخت، تا قسمت‌های پشت به باد^{۴۴} امتداد دارند. گسترش این نیم‌موج‌ها و اندازه آن‌ها در حرکت از سیلوی لاغر به سیلوی کوتاه کاهش یافته و عملاً در سیلوی کوتاه پس از ناحیه ایستا، زوال یافته است. نکته قابل اشاره دیگر به تعویض جهت در نیم‌موج پیرامونی، در محل مولد رو به باد^{۴۵}، در سیلوی کوتاه در مقایسه با سایر سازه‌ها است. همچنین اثر بیضی‌گون شدن^{۴۶} در سطح مقطع سیلوی لاغر، تحت اثر مکش باد دیده می‌شود [8].

در حالت بارگذاری سیلوی مستقر در گروه سیلوها، نتایج فشار بحرانی حاصل از تحلیل‌های خطی و غیرخطی، نسبت به یکدیگر، تفاوت بیشتری را در مقایسه با حالت پیشین (بارگذاری سیلوی منفرد) نشان می‌دهند (جدول ۵). با این وجود، مقادیر مقاومت بیشتر پیش‌بینی شده توسط تحلیل LBA، با کاهش نسبت ابعادی در سیلوها، به نتایج تحلیل غیرخطی نزدیک می‌شود (اختلاف حدود ۲۰٪ در سیلوی لاغر، ۱۸٪ در سیلوی میانی و تنها حدود ۳٪ در سیلوی کوتاه). به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت، برای سیلوهای

۴۳ half-wave

۴۴ leeward

۴۵ windward generator

۴۶ ovalisation

بارگذاری سیلوی منفرد، تنها تفاوت محسوس، در تعداد بیشتر نیم‌موج‌های پیرامونی شکل‌گرفته (۲ نیم‌موج بیشتر) در هر یک از سه سیلو است. فرم کمانش‌یافته سیلوها در تحلیل غیرخطی، تفاوت قابل توجهی با مُد خطی کمانشی سازه‌ها دارد. اگرچه در این حالت نیز تک نیم‌موج کمانشی در راستای ارتفاعی، بوجود می‌آید؛ اما طول آن بلندتر بوده و تقریباً کمی کمتر از کل ارتفاع جداره استوانه‌ای را می‌پوشاند. این مورد به ویژه در سیلوهای لاغر و میانی ملموس‌تر است.

جدول ۵. خلاصه نتایج مقاومت کمانشی در برابر باد سیلوهای با سقف بسته، تحت حالت بار سیلوی مستقر در گروه سیلوها.

Analysis type	Parameter	Slender silo	Intermediate slender silo	Squat silo
LBA	q_b [N/m ²]	757.28	751.07	619.89
	v_b [m/s]	34.81	34.67	31.49
GMNA	q_b [N/m ²]	599.32	615.92	599.74
	v_b [m/s]	30.97	31.39	30.98

Table 5- Summary of wind buckling resistance under grouped load case for silos with closed roof.

همچنین تعداد و محدوده بروز نیم‌موج‌های پیرامونی در تحلیل غیرخطی کاملاً تغییر می‌یابد. مشابه بارگذاری سیلوی منفرد در این حالت نیز، گسترش نیم‌موج‌ها به سمت پشت به باد، مشاهده می‌گردد. دامنه این نیم‌موج‌ها در سیلوهای لاغر و میانی، بزرگ‌تر از سیلوی کوتاه است. در حدود زاویه ۹۰ درجه نسبت به محور مولد روبه باد در سیلوها، به ویژه در نوع لاغر و میانی، دامنه نیم‌موج‌های پیرامونی افزایش می‌یابد. این پدیده در حول ناحیه تغییر بار باد از فشار به مکش، مطابق توزیع فشار پیرامونی ارائه شده در شکل (۲) ایجاد شده است.

۳-۲- کمانش تحت باد سیلوهای دارای بازشو در سقف

همان‌گونه که در قسمت بارگذاری باد اشاره شد، در صورتی که سیلوها در سقف دارای بازشو جهت تهویه باشند، اضافه فشار داخلی ΔC_p برابر با $+0/4$ باید در نظر گرفته شود. مورد اخیر در اعمال توزیع فشار باد در تحلیل‌های این قسمت در نظر گرفته شده است. به لحاظ شکل مُد کمانش خطی و فرم

شکل ۵. فرم کمانش یافته خطی (با جابجایی نرمال‌شده) و غیرخطی سیلوها تحت حالت بار سیلوی مستقر در گروه سیلوها با توزیع تنش ون-میسز به پاسکال.

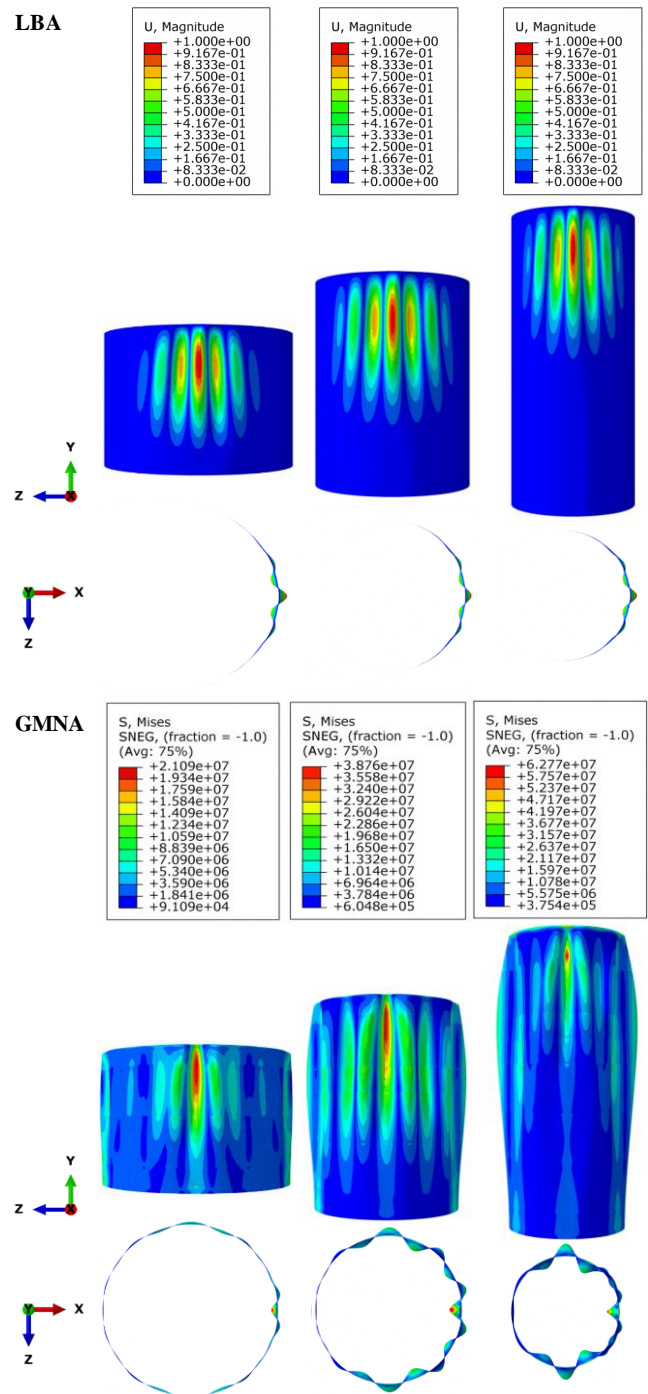


Fig. 5. Linear (with normalized displacements) and non-linear buckled form of silos under grouped load case with von Mises stress distribution in Pa.

مطابق با شکل (۵)، مُد کمانش خطی سیلوها در این حالت نیز در بخش‌های بالایی جداره سازه و در سمت روبه باد به صورت گودی و برآمدگی رخ می‌دهد. در مقایسه با حالت

سیلوی دارای بازشو در سقف است. پس به طور میانگین اعمال اضافه فشار، اثر یکسان و با رابطه معکوس در مقاومت کمانشی سیلوها دارد. بنابراین، از سیلویی با سقف بسته در مقایسه با همان سیلو با سقف دارای بازشو و تحت بار باد آیین‌نامه اروپا، می‌توان انتظار متوسط ۰.۴٪ مقاومت کمانشی بیشتر داشت.

در ادامه به مقایسه رفتار کمانشی افزایشی سیلوها تحت انواع حالات بارگذاری اشاره شده در مقاله (یعنی حالت بارگذاری منفرد و گروهی و هر یک با دو فرض وجود سقف بسته و سقف دارای بازشو) پرداخته می‌شود. در این راستا، از نمودارهای فشار سرعت پایه (q_b) در مقابل جابه‌جایی شعاعی پیشینه در محل ناحیه ایستا، در تبیین رفتار کمانشی و پس-کمانش هر سیلو کمک گرفته می‌شود. شکل (۶) این نمودارها را برای نمونه سیلوی لاغر، میانی و کوتاه، تحت هر یک از حالات بارگذاری یادشده در مقاله، نشان می‌دهد.

در مقایسه کمانش تحت بارگذاری سیلوی منفرد و سیلوی مستقر در گروه سیلوها، بارگذاری گروه سیلوها به‌طور متوسط مقاومت کمانشی کمتری را حاصل می‌دهد. این موضوع چه در حالت سیلوهای با سقف بسته و چه در موارد با وجود بازشو در سقف، برقرار است. هرچند اشاره به این موضوع نیز لازم بنظر می‌رسد، که در مدل‌سازی‌ها، اندرکنش سیلوهای مجاور در گروه سیلوها و آثار افزایش یا کاهش احتمالی در مقاومت نهایی آن‌ها، لحاظ نشده است. زیرا سیلوهای مستقر در یک گروه اغلب از طریق نردبان‌ها یا راهروهای دسترسی به محل بارگیری و بازرسی سازه در سقف، به یکدیگر ارتباط و اتصال دارند.

تحت بارگذاری سیلوی منفرد، در تمامی سازه‌های مورد بررسی پس از قسمت کاملاً خطی ابتدای نمودارها، افزایش دامنه تغییر شکل، طی سطح تراز تقریباً ثابتی از فشار دیده می‌شود؛ سرانجام کاهش ناگهانی در میزان فشار، ادامه مسیر تعادل را شکل می‌دهد. در حالت بارگذاری سیلوی مستقر در گروه سیلوها، فرم نمودارها غیرخطی‌تر از حالت قبل است. در این حالت و اندکی پس از رسیدن به بار حدی^{۴۷}، برای

کمانش‌یافته سیلوها از تحلیل غیرخطی، نسبت به شکل‌های ارائه شده در مورد سیلوی با سقف بسته شکل‌های (۴ و ۵)، هیچ‌گونه تفاوتی ملاحظه نشد. به این جهت از تکرار شکل‌ها چشم‌پوشی شده است. در واقع اضافه فشار روی شکل کمانشی سازه در تحلیل خطی و غیرخطی بی‌تأثیر بوده است. جدول‌های (۶ و ۷) به ترتیب مقادیر مقاومت کمانشی هر سیلو را در حالت بارگذاری سیلوی منفرد و سیلوی مستقر در گروه سیلوها، با فرض وجود بازشو در سقف ارائه می‌نماید. اثر اضافه فشار آیین‌نامه به صورت افزایش فشار روبه داخل در ناحیه ایستا، نمود می‌یابد. در واقع در زاویه θ برابر با صفر، مقدار C_p از ۱ به ۱/۴ افزایش یافته است. همچنین قسمت بیشتری از سطح سیلو تحت فشار قرار گرفته و از سهم مساحت تحت مکش کاسته شده است.

جدول ۶. خلاصه نتایج مقاومت کمانشی در برابر باد سیلوهای با سقف دارای بازشو، تحت حالت بار سیلوی منفرد.

Analysis type	Parameter	Slender silo	Intermediate slender silo	Squat silo
LBA	q_b [N/m ²]	505.82	536.42	453.57
	v_b [m/s]	28.45	29.30	26.94
GMNA	q_b [N/m ²]	499.31	534.88	452.00
	v_b [m/s]	28.26	29.25	26.89

Table 6- Summary of wind buckling resistance under isolated load case for vented silos with a small opening.

جدول ۷. خلاصه نتایج مقاومت کمانشی در برابر باد سیلوهای با سقف دارای بازشو، تحت حالت بار سیلوی مستقر در گروه سیلوها.

Analysis type	Parameter	Slender silo	Intermediate slender silo	Squat silo
LBA	q_b [N/m ²]	526.32	522.85	432.05
	v_b [m/s]	29.02	28.92	26.29
GMNA	q_b [N/m ²]	438.35	447.17	424.70
	v_b [m/s]	26.48	26.75	26.07

Table 7- Summary of wind buckling resistance under grouped load case for vented silos with a small opening.

با بررسی نتایج مربوط به سیلوی با سقف بسته و سیلوی دارای بازشو در سقف (مقایسه جدول‌های ۴ با ۶ و ۵ با ۷)، مقاومت سیلوی با سقف بسته در حدود ۰/۴۴-۰/۳۷ بیشتر از

^{۴۷} limit load

۴- نتیجه گیری

این مقاله به تحلیل رفتار کمانشی سیلوهای استوانه‌ای فولادی تحت بارگذاری باد مطابق با آیین‌نامه اروپا [18, 24] می‌پردازد. جمع‌بندی زیر، براساس یافته‌های این پژوهش قابل ارائه است:

در تمامی حالات بارگذاری اشاره شده در مقاله، مُد خطی کمانش، الگوی زوال سینوسی^{۴۸} در نیم‌موج‌های پیرامونی را نشان می‌دهد. در جهت ارتفاعی نیز تک نیم‌موج کمانشی ایجاد می‌شود. همچنین تمرکز تغییرشکل‌های موضعی، در قسمت‌های فوقانی جداره (با ضخامت کمتر) و در جهت روبه باد است. همچنین با توجه به ضخامت اندک جداره و اندازه تنش‌های ایجاد شده در سیلوه‌ها در قیاس با معیار جاری شدن ون‌میسز، کمانش تحت باد سازه‌ها در حد الاستیک رخ داده است. این مورد در مطالعات پیشین توسط گریز و درلر [21] و نیز توسط چن و روتر [22] مشاهده شده بود.

تفاوت فرم کمانش یافته سیلوه‌ها در تحلیل غیرخطی در مقایسه با مُد کمانش خطی، مربوط به گسترش بیشتر نیم‌موج‌های پیرامونی تا سمت پشت به باد سازه‌ها است. در سیلوی کوتاه، دامنه این نیم‌موج‌ها کوچک‌تر است. همچنین در بارگذاری سیلوی مستقر در گروه سیلوه‌ها نسبت به بارگذاری سیلوی منفرد، تعداد نیم‌موج‌های بیشتری در راستای پیرامونی تشکیل شده و طول تک نیم‌موج ارتفاعی نیز بلندتر است.

مقاومت کمانشی به‌دست آمده از تحلیل خطی در قیاس با تحلیل غیرخطی همواره بزرگتر بوده و بسته به شکل بارگذاری دو حالت را نشان می‌دهد: الف) در بارگذاری سیلوی منفرد، نتایج هر دو روش به یکدیگر نزدیک بوده و اختلاف کمتر از ۲٪ دارند؛ ب) تحت بارگذاری سیلوی مستقر در گروه سیلوه‌ها، آثار غیرخطی هندسی می‌تواند تا ۲۰٪ باعث کاهش ظرفیت کمانشی گردند. این اثر در سیلو کوتاه محدود به ۵٪ بوده است.

مقاومت سیلوی با سقف بسته در حدود ۰/۴۴-۰/۳۷ بیشتر از سیلوی دارای بازشو در سقف است. پس به طور میانگین اعمال اضافه فشار، اثر یکسان و با رابطه معکوس در مقاومت

مسیر تعادل به یکباره برعکس می‌شود. در نهایت در تراز پایین‌تر از تراز بار حدی، دوباره مسیر به آرامی به جهت اولیه خود بازگشته و مسیر تعادل با افزایش در جابه‌جایی و کاهش سطح فشار ادامه می‌یابد.

شکل ۶. نمودارهای غیرخطی بار-جابه‌جایی سیلوی: (الف) لاغر، (ب) میانی و (ج) کوتاه.

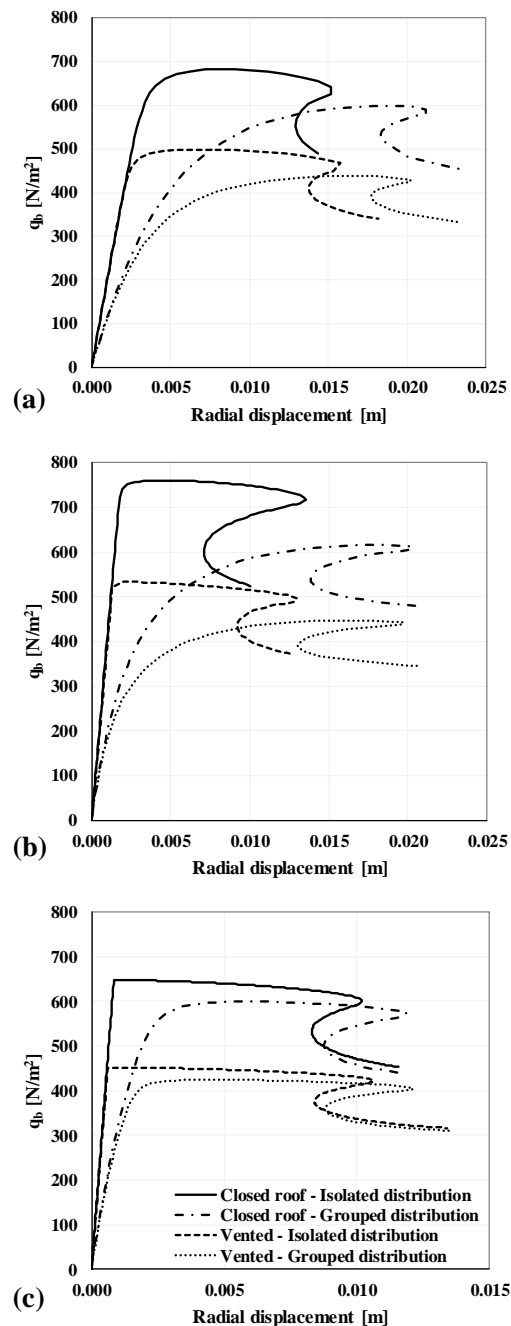


Fig. 6. Non-linear load-displacement curves of: (a) slender, (b) intermediate slender and (c) squat silo.

^{۴۸} decaying sinusoidal pattern

- [13] Kebeli H. V., Bucklin R. A., Gurley K. & Reinhold T. 2001 Wind pressure coefficients of conical roofs on grain bins. *Americas* (Engl. Ed):1.
- [14] Macdonald P. A., Kwok K. C. S. & Holmes J. D. 1988 Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: I. Point pressure measurements on isolated structures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 31:165–87.
- [15] Macdonald P. A., Holmes J. D. & Kwok K. C. S. 1990 Wind loads on circular storage bins, silos and tanks. II. Effect of grouping. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 34:77–95.
- [16] Macdonald P. A., Holmes J. D. & Kwok K. C. S. 1990 Wind loads on circular storage bins, silos and tanks III. Fluctuating and peak pressure distributions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 34:319–37.
- [17] Sabransky I.J. & Melbourne W. H. 1987 Design pressure distribution on circular silos with conical roofs. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 26:65–84.
- [18] EN 1993-4-1. 2007 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 4-1: Silos. Brussels: CEN.
- [19] Nielsen J. & Rotter J. M. 2017 On the definition of design values for loads on silos and tanks. *Advances in Structural Engineering*.
- [20] Ansourian P. 1992 On the buckling analysis and design of silos and tanks. *Journal of Constructional Steel Research* 23:273–94.
- [21] Greiner R. & Derler P. 1995 Effect of imperfections on wind-loaded cylindrical shells. *Thin-Walled Structures* 23:271–81.
- [22] Chen L. & Rotter J. M. 2012 Buckling of anchored cylindrical shells of uniform thickness under wind load. *Engineering Structures* 41:199–208.
- [23] Zhao Y., Cao Q. & Su L. 2013 Buckling design of large circular steel silos subject to wind pressure. *Thin-Walled Structures* 73:337–49.
- [24] EN 1991-1-4. 2005 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions. Brussels: CEN.
- [25] Sadowski A. J. & Rotter J. M. 2011 Steel silos with different aspect ratios: I—Behaviour under concentric discharge. *Journal of Constructional Steel Research* 67:1537–44.
- [26] Dassault Systèmes Simulia. Abaqus CAE User's Manual. 2012.
- [27] 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* 74:143–53.
- [28] 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.
- [29] Song C. Y. 2004 Effects of patch loads on structural behavior of circular flat-bottomed steel silos. *Thin-Walled Structures* 42:1519–42.
- [30] Maleki S. & Mehrethran A. M. 2018 3D wind buckling analysis of long steel corrugated silos with vertical stiffeners. *Engineering Failure Analysis* 90:156–167.
- [31] Raeesi A., Ghaednia H., Zohrehheydariha J. & Das S. 2017 Failure analysis of steel silos subject to wind load. *Engineering Failure Analysis* 79:749–61.

کمانشی سیلوه‌ها دارد. بنابراین، از سیلویی با سقف بسته در مقایسه با همان سیلو با سقف دارای بازشو و تحت بار باد آیین‌نامه اروپا، می‌توان انتظار متوسط ۴۰٪ مقاومت کمانشی بیشتر داشت.

بارگذاری سیلوی مستقر در گروه سیلوه‌ها در مقایسه با بارگذاری سیلوی منفرد، به‌طور متوسط مقاومت کمانشی کمتری را نتیجه می‌دهد (تحلیل غیرخطی ۲۰–۷ درصد فشار بحرانی را در بارگذاری سیلوی مستقر در گروه سیلوه‌ها کمتر پیش‌بینی کرده است). این موضوع چه در حالت سیلوه‌های با سقف بسته و چه در موارد با وجود بازشو در سقف، برقرار است. در مطالعه ملکی و مهرطهران [30] نیز چنین نتیجه‌ای برای سیلوه‌های با ورق موجدار با عمق موج کم (که نزدیک‌تر به هندسه ورق صاف است) بدست آمده است.

References

۵- مراجع

- [1] EN 1991-4. 2006 Eurocode 1: Actions on structures - Part 4: Silos and tanks. Brussels: CEN.
- [2] Rotter J. M. 2001 Pressures, stresses and buckling in metal silos containing eccentrically discharging solids. *Festschrift Richard Greiner, Celebr Vol 60th Birthd Prof Richard Greiner, TU Graz, Austria*; 85–104.
- [3] 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.
- [4] Sadowski A. J. & Rotter J. M. 2011 Buckling of very slender metal silos under eccentric discharge. *Engineering Structures* 33:1187–94.
- [5] Cao Q. & Zhao Y. 2018 Buckling design of large eccentrically filled steel silos. *Powder Technology* 327:476–88.
- [6] Sadowski A. J. & Rotter J. M. 2012 Slender thin cylindrical shells under unsymmetrical strip loads. *Thin-Walled Structures* 61:169–79.
- [7] Wang P., Zhu X., Liu M. & Li Y. 2017 Buckling behaviors and simplified design method for steel silos under locally distributed axial load. *Journal of Constructional Steel Research* 134:114–34.
- [8] Greiner R. & Guggenberger W. 2004 Tall cylindrical shells under wind pressure. In: Rotter J. M & Teng J. G, editors. *Buckling of Thin Metal Shells*, London; 198–206.
- [9] Greiner R. 1998 Cylindrical shells: wind loading. *silos: Fundamentals of Theory, Behaviour, and Design*, vol. 17, London: E & FN Spon; 378–99.
- [10] Sadowski A. J, Fajuyitan O.K. & Wang J. A. 2017 computational strategy to establish algebraic parameters for the Reference Resistance Design of metal shell structures. *Advances in Engineering Software* 109:15–30.
- [11] Rotter J. M. 2011 Shell buckling design and assessment and the LBA-MNA methodology. *Stahlbau*;80:791–803.
- [12] EN 1993-1-6. 2007 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-6: Strength and stability of shell structures. Brussels: CEN.

Buckling assessment of cylindrical steel silos under wind loading

Alireza Moazezi Mehretehran^{1*}, Shervin Maleki²

1- Ph.D. candidate, 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 susceptible to instability under wind pressure when they are empty or only partially filled. Steel silos are widely used for storage of particulate solids. They are an integral part of many industries. They are almost always constructed from many short cylindrical shells of different thicknesses as the stress resultant on the wall progressively increases towards the base. Silos may be composed of flat or corrugated sheets. Different stiffening methods are employed in the design of these structures. The use of horizontal stiffening rings in the circumferential direction or vertical stiffeners along the meridional direction of the cylindrical shell are two paractical strengthening strategies.

This paper investigates numerically the wind buckling behavior of three steel silos. They are composed of flat sheets with stepped walls with multiple discrete steps in thickness. No stiffeners are used in the silos. In order to cover the main aspect ratios mentioned in Eurocode, three different silos were considered. The dimensions were chosen to have similar capacities for storage containers. The steel silos were designed by global numerical analysis using geometrically and materially non-linear analysis with imperfections (GMNIA) for the discharge loads according to Eurocode for wheat as the ensiled material.

The vertical and circumferential distributions of wind loading were adopted from Eurocode. Two proposed circumferential pressure distributions for an isolated silo and a silo in a group were taken into consideration. Where the silo does not have a closed roof, an additional uniform value of internal underpressure coefficient should be considered, thus increasing the net stagnation inward pressure on the silo walls. The effects of additional inward pressure on a vented silo with a small opening were specially explored through the paper. Therefore, a total of four different load cases were examined in this paper: isolated load case and grouped load case, each of them for silos with closed roof and for vented silos.

Two types of analyses were undertaken for the wind buckling assessment of the silos: the linear elastic bifurcation analysis (LBA) and the geometrically and materially non-linear analysis (GMNA). However, due to small wall thickness, the material non-linearity did not take place in non-linear wind buckling analyses (GMNA=GNA). The buckling mode obtained from LBA, characterized by one meridional half-wave and several circumferential half-waves of decaying sinusoidal form on the upper windward side of the silos. The GMNA buckle modes represented an approximately similar meridional half-wave found from LBA eigenmodes. Nevertheless, in the circumferential direction, non-uniform buckle half-waves were expanded almost all around the silo walls with decaying amplitudes on the leeward side. More circumferential half-waves were formed in the grouped load case in both LBA and GMNA, as well.

According to non-linear load-deflection curves, the buckling in all load cases was of snap-back type. The curves showed more non-linear characteristics in group load case. Moreover, in general, the wind buckling resistance of silos under grouped load case was less than isolated load case. Finally, silos with closed roof compared with vented silos with a small opening, exhibited about 40% more wind buckling resistance.

Keywords: Steel cylindrical silo, Buckling, Eurocode, Wind load, Abaqus