

## Axial Buckling of Spiral Steel Folded Silo

Parham Pourzeynali<sup>1</sup>, Alireza Moazezi Mehretehran<sup>2\*</sup>

1- Master student in Earthquake Engineering, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

### ABSTRACT

Cylindrical steel silos are widely used for storing granular materials in industry. Due to their thin wall thickness, these structures are highly susceptible to buckling under applied loads. Steel silos are constructed in various forms, such as flat sheet, corrugated sheet, and spiral silos. Despite the widespread use of spiral silos, most previous studies have focused on the behavior of flat sheet and corrugated silos. Accordingly, this study is the first research to investigate the buckling behavior of spiral silos. Silos, depending on their use, must first be designed to withstand gravity loads caused by granular materials during the loading and unloading process. Therefore, current design codes, such as the Eurocode, provide equations for buckling loads under axial compression. Hence, the buckling behavior of these silos subjected to axial compression is assessed in this research by considering the relevant Eurocode provisions. Spiral silos offer advantages such as, semi-automated construction and mechanical connections, which leading to faster construction. Due to the construction method, spiral rings are formed around the entire height of the silo which improving the buckling behavior. Hence, the specific shape of the silo, the angle of the circumferential rings, and the sensitivity to geometric imperfections are studied in detail through finite element analysis using Abaqus software. Furthermore, to investigate the effects of the specific shape of spiral silos on buckling strength, a comparison is made between this type and equivalent flat sheet silos.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 06 February 2025

Revise Date: 07 June 2025

Accept Date: 09 July 2025

### Keywords:

Spiral Steel Folded Silo  
Axial Buckling  
Circumferential stiffener  
Imperfection sensitivity  
Finite Element Analysis

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.502652.3643

\*Corresponding author: Alireza Moazezi Mehretehran  
Email address: a.moazezi@sharif.edu

## رفتار کمانشی سیلوهای حلقوی فولادی تحت فشار محوری

پرهام پورزینلی<sup>۱</sup>، علیرضا معززی مهرطهران<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

### چکیده

سیلوهای فولادی استوانه‌ای به طور گسترده در ذخیره‌سازی مواد دانه‌ای در صنایع مختلف کاربرد دارند. به دلیل ضخامت کم دیواره، این سازه‌ها به شدت مستعد کمانش تحت بارهای وارده هستند. سیلوهای فولادی به شکل‌های مختلفی همچون سیلوهای ورق صاف، ورق موجدار و سیلوهای حلقوی ساخته می‌شوند. علیرغم استفاده گسترده از سیلوهای حلقوی، بیشتر مطالعات پیشین معطوف به بررسی رفتار سیلوهای ورق صاف و ورق موجدار بوده است. از این روی، پژوهش حاضر به عنوان یکی از اولین مطالعات در خصوص سیلوهای حلقوی، سعی در تبیین رفتار این سازه‌ها دارد. سیلوها با توجه به کاربری خود، ابتدا لازم است تحت بارهای ثقلی ناشی از محتویات دانه‌ای طی فرآیند بارگیری و تخلیه، طراحی شوند. در این خصوص آئین‌نامه‌های پیشرو طراحی، همچون آئین‌نامه اروپا به ارائه روابط باربری کمانشی تحت فشار محوری می‌پردازند. در همین راستا رفتار کمانشی این سیلوها تحت فشار محوری در این مطالعه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سیلوهای حلقوی با توجه به مزایایی همچون ساخت نیمه اتوماتیک و اتصالات دستگامی، سرعت ساخت بالایی دارند. همچنین، در محل درز اتصال با توجه به روش ساخت این سیلوها، سخت‌کننده‌هایی یکپارچه در پیرامون و سراسر ارتفاع سازه شکل گرفته که منجر به بهبود رفتار کمانشی این سیلوها می‌شود. از این روی، به طور مشخص اثر شکل خاص این سازه، زاویه سخت‌کننده‌های پیرامونی و میزان حساسیت به نقص هندسی طی تحلیل‌های المان محدود در نرم افزار آباکوس مطالعه شده است. همچنین، جهت بررسی اثرات شکل خاص سیلوهای حلقوی بر ظرفیت کمانشی، مقایسه‌ای بین این نوع و نمونه سیلوهای ورق صاف معادل صورت پذیرفته است.

کلمات کلیدی: سیلوهای فولادی حلقوی، کمانش محوری، سخت‌کننده‌های پیرامونی، حساسیت به نقص، تحلیل المان محدود

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/jsce.2025.502652.3643					
10.22065/jsce.2025.502652.3643	۱۴۰۴/۱۲/۲۹	۱۴۰۴/۰۴/۱۸	۱۴۰۴/۰۴/۱۸	۱۴۰۴/۰۳/۱۷	۱۴۰۳/۱۱/۱۸
			*نویسنده مسئول:		
			علیرضا معززی مهرطهران		
			a.moazezi@sharif.edu		
			پست الکترونیکی:		

## ۱- مقدمه

سیلوهای فولادی از سازه‌های متداول در صنایع مختلف، جهت ذخیره‌سازی مواد دانه‌ای هستند. این سیلوها، عموماً دارای سطح مقطع دایروی بوده و از به هم پیوستن ورق‌های فولادی صاف یا موجدار ساخته می‌شوند. سیلوها از نظر اتصال به سه دسته پیچی، جوشی و حلقوی<sup>۱</sup> تقسیم می‌شوند. سیلوهای حلقوی نسبت به انواع دیگر رواج کمتری دارند و روش ساخت منحصر به فرد آن شامل یک فرآیند منظم می‌شود که طی آن یک رول ورق فولادی با استفاده از تکنیکی خاص<sup>۲</sup> به شکل یک مارپیچ درآمده و به یکدیگر متصل می‌شوند. به رغم استفاده از سیلوهای حلقوی در صنایع مختلف، مطالعات بسیار محدودی در خصوص رفتار این سازه‌ها انجام شده است. بنابراین هدف از پژوهش حاضر، بررسی رفتار این نوع سیلوها تحت فشار محوری به عنوان یکی از بارهای کلیدی در طراحی آن‌ها است. لازم به توضیح است که با توجه به جداره نازک بودن این سازه‌ها، طراحی کمانشی اولویت می‌یابد. در این خصوص، مطالعات نزدیک به موضوع پژوهش ذیلاً ارائه می‌شود. در پژوهشی توسط ژنگ لی و همکاران [۱]، رفتار کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده با سخت‌کننده‌های پیرامونی تحت فشار محوری با استفاده از روش‌های تجربی و عددی بررسی شده است. این سخت‌کننده‌ها به طور مؤثری باعث افزایش مقاومت کمانشی شده و ظرفیتی تا ۲/۵ برابر پوسته‌های بدون سخت‌کننده فراهم می‌کنند. آن‌ها در مطالعه خود ترکیبی از آزمایش‌های کوچک مقیاس، اسکن سه‌بعدی از سطح نمونه‌ها برای استخراج نقص‌های هندسی<sup>۳</sup> و تحلیل اجزای محدود را انجام دادند. مطالعات پارامتری حاکی از آن بود که شکل سخت‌کننده، فاصله آن‌ها از یکدیگر و هندسه نقص‌ها تأثیر قابل توجهی بر عملکرد سازه‌ای دارند. همچنین آن‌ها به ارائه برخی توصیه‌ها جهت طراحی بهینه پوسته‌های همراه با سخت‌کننده پیرامونی پرداختند. واگنر و همکاران [۲] در پژوهش خود، به بررسی طراحی پوسته‌های استوانه‌ای تحت فشار محوری پرداختند. تمرکز اصلی این مطالعه بر توسعه ضرایب کاهش مقاومت کمانشی<sup>۴</sup> بوده است. ضرایب کاهش سنتی، که عمدتاً بر پایه مطالعات تجربی است، برای پیش‌بینی ظرفیت کمانشی پوسته‌های مدرن بسیار محافظه‌کارانه است. بنابراین در این پژوهش از طریق روش‌های تحلیلی و عددی مختلف، از جمله روش انرژی کاهش یافته و نقص‌های هندسی ناشی از اعمال مدهای کمانش خطی، برای تعیین ظرفیت کمانشی پوسته‌ها استفاده شد. این مطالعه، اطلاعات جامعی در خصوص انواع روش‌های اعمال نقص هندسی به پوسته‌ها و تعیین مقاومت کمانشی آن‌ها می‌دهد. لازم به اشاره است که در موضوع روش‌های اعمال نقص هندسی در پوسته‌ها، مطالعه کاسترو و همکاران [۳]، نیز قابل توجه است. پسترناک و همکاران [۴]، مروری بر مطالعات حاضر در حوزه پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده با سخت‌کننده‌های پیرامونی ارائه دادند. وجود سخت‌کننده‌های پیرامونی به دلیل ایجاد فشار منفی در محیط پوسته‌های استوانه‌ای سبب افزایش ظرفیت کمانشی در برابر بار باد می‌شود و همچنین موجب افزایش ظرفیت کمانش محوری نیز می‌شود. ونگ و همکاران [۵]، با هدف توسعه دستورالعملی دقیق برای طراحی پوسته‌های تقویت‌شده با شبکه‌ای از سخت‌کننده‌ها<sup>۵</sup>، مطالعات گسترده‌ای انجام دادند. در این مطالعه، از طریق تلفیق مدل‌سازی عددی المان محدود و آزمایش‌های تجربی، به بررسی ظرفیت کمانشی پوسته‌های فولادی تحت فشار محوری پرداخته شده است. همچنین، محققان با استفاده از روش‌های مختلف، تأثیر نقص‌های هندسی بر عملکرد پوسته‌ها را مورد ارزیابی قرار دادند. در پژوهشی که توسط ونگ و همکاران [۶] انجام شده است، رفتار کمانشی سیلوهای فولادی تحت بارگذاری ترکیبی فشار داخلی و بار محوری توزیع شده موضعی<sup>۶</sup> با استفاده از روش اجزای محدود مورد بررسی واقع شد. با مطالعه تأثیر پارامترهایی نظیر: نسبت شعاع به ضخامت (R/t)، فشار داخلی و زاویه مرکزی بار لبه‌ای موضعی<sup>۷</sup> بر مدهای کمانش، تشکیل قوس فشاری بر روی جداره سیلو، توزیع تنش کمانش، پدیده کمانش در سیلوها را مورد مطالعه قرار دادند. سادوسکی و روتر [۷]، رفتار پنج سیلوی استوانه‌ای با ضخامت متغیر و همچنین نسبت‌های ابعادی متفاوت را تحت بارگذاری تخلیه بدون خروج از مرکزیت<sup>۸</sup> طبق استاندارد اروپا [۸]، مورد تحلیل و طراحی قرار دادند. در این مطالعه، تحلیل‌های غیرخطی اجزای محدود نشان‌دهنده آن است که ضرایب بار محاسباتی<sup>۹</sup> به طور قابل توجهی بالاتر از ضرایب ایمنی جزئی<sup>۱۰</sup> در طراحی هستند که حاکی

<sup>1</sup> Lipp or Spiral

<sup>2</sup> Lipp Double-Seam-System

<sup>3</sup> Geometrical imperfection

<sup>4</sup> knockdown factors

<sup>5</sup> Isogrid stiffened cylindrical shell

<sup>6</sup> Locally distributed axial load (LDAL)

<sup>7</sup> Local edge load Center Angle (LCA)

<sup>8</sup> Concentric discharge loading

<sup>9</sup> Computed load factor

<sup>10</sup> Partial safety factor

از محافظه کارانه بودن بیش از حد آئین‌نامه‌های طراحی موجود است. چائو و ژائو [۹]، رفتار کمانشی سیلوی فولادی با لاغری‌های متفاوت را تحت بارگذاری‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. با استفاده از نرم‌افزار انسیس<sup>۱</sup>، مدل‌های عددی برای تحلیل کمانش سیلوی فولادی ایجاد شده و مشخص شده است که بارگذاری با خروج از مرکزیت به طور قابل توجهی بر ظرفیت باربری سیلوه‌ها تأثیرگذار است و باعث کاهش چشمگیر راندمان ذخیره‌سازی می‌شود. ووچیک و تژچمان [۱۰]، به بررسی پایداری سیلوه‌های فولادی حاوی مواد دانه‌ای پرداختند. در این مطالعه با استفاده از تحلیل‌های عددی، تأثیر وجود مواد ذخیره‌شده در سیلوه‌ها بر مقاومت آن‌ها در برابر کمانش مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که مواد درون سیلوه‌ها باعث افزایش ظرفیت کمانشی سیلوه‌ها شده و این افزایش به عوامل مختلفی مانند ضخامت جداره و نوع مواد بستگی دارد. معززی و ملکی [۱۱]، با هدف ارزیابی دقیق‌تر ضوابط طراحی آئین‌نامه‌های اروپا [۸، ۱۲، ۱۳]، برای سیلوه‌های فولادی، مطالعه‌ای جامع بر روی رفتار کمانشی محوری این سازه‌ها تحت بارهای ناشی از تخلیه و بارگیری ناشی از محتویات درون سیلو انجام دادند. در این پژوهش، سه سیلو با مشخصات هندسی متفاوت (لاغر<sup>۲</sup>، متوسط<sup>۳</sup> و کوتاه<sup>۴</sup>) که حاوی گندم بودند، تحت تحلیل‌های عددی غیرخطی قرار گرفته و نتایج حاصل با ضوابط آئین‌نامه مقایسه شدند. نوآوری اصلی این پژوهش، در نظرگیری انواع مختلف نقص‌های هندسی در مدل‌سازی عددی سیلوه‌ها بوده است. رضائی و معززی [۱۴] مطالعه‌ای جامع در زمینه تأثیر بازشو بر ظرفیت باربری سیلوه‌های فولادی تحت فشار محوری انجام داده‌اند. تمرکز این پژوهش بر بررسی نوع مقطع بازشو (مربعی و دایره‌ای)، محل قرارگیری بازشو در ارتفاع سیلو، شرایط تکیه‌گاهی و همچنین نقش رینگ‌های سخت‌کننده در اطراف بازشو بوده است. افزون بر این، با بهره‌گیری از روش رگرسیون پواسون، رابطه‌ای برای برآورد مقاومت واقعی کمانشی ارائه شد که تنها حدود ۱۵ درصد با نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی اختلاف داشت. مانیشی و همکاران [۱۵] در پژوهش خود از روش شبکه عصبی مصنوعی<sup>۵</sup> (ANN) برای پیش‌بینی فشارهای محوری و قائم وارد بر جداره سیلوه‌های لاغر با نسبت ارتفاع به قطر ۴، ۶ و ۸ ناشی از محتوای داخلی (ذرت) استفاده کردند. آن‌ها نتایج به‌دست‌آمده را با داده‌های تجربی و نیز با خروجی‌های روش‌های رگرسیون خطی، چندجمله‌ای و روابط آئین‌نامه‌های اروپا [۸] و استرالیا [۱۶] مقایسه کردند. نتایج نشان داد که روش ANN بالاترین دقت را در پیش‌بینی نیروهای ناشی از محتوای داخلی بر دیواره سیلو ارائه می‌دهد. سادوسکی و فیلیپیدیس [۱۷]، به بررسی منحنی ظرفیت پوسته‌های استوانه‌ای تحت فشار محوری یکنواخت و خمشی یکنواخت در نسخه‌ی جدید و تاکنون منتشر نشده‌ی سال ۲۰۲۵ آئین‌نامه EN 1993-1-6 پرداخته‌اند. در نسخه‌های پیشین، منحنی مربوط به فشار محوری یکنواخت به دلیل حساسیت بالای آن به نقص‌های هندسی و رفتار کمانشی الاستیک در پوسته‌های بسیار لاغر، به‌عنوان گزینه‌ی محافظه‌کارانه‌ی پیش‌فرض در نظر گرفته می‌شد. با این حال، در نسخه‌ی جدید این آئین‌نامه، برای پوسته‌های با لاغری متوسط، منحنی ظرفیت مربوط به خمشی یکنواخت به علت رفتار کمانشی موضعی ناشی از پلاستیسیته‌ی جزئی محیطی، محافظه‌کارانه‌تر ارزیابی شده است. این بازنگری بر پایه تحلیل‌های عددی دقیق و مقایسه مستقیم رفتار کمانشی دو نوع سیستم بارگذاری انجام شده است.

در سال ۱۹۶۹ در کشور آلمان، برای نخستین بار سیلویی تحت عنوان سیلوی حلقوی توسط خاویر لپ<sup>۶</sup> ساخته شد. همانگونه که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، نحوه به هم پیوستن ورق‌های تشکیل‌دهنده سیلو در محل درز اتصال به شکل‌گیری حلقه‌هایی پیوسته در پیرامون و ارتفاع سازه منجر می‌شود. مطابق شکل، حلقه‌های پیرامونی به شکل مارپیچ بوده و نسبت به افق زاویه دارند. یکی از ارکان اصلی مطالعه حاضر بررسی اثر زاویه این حلقه‌ها بر مقاومت کمانشی پوسته است. پیچیوگین و همکاران [۱۹]، مجموعه‌ای از مطالعات اولیه بر روی روش‌های ساخت، مزایا و شرایط بارگذاری این نوع سیلوه‌ها انجام دادند. با این وجود، در جهت بررسی رفتار کمانشی این نوع سیلوه‌ها و تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار آن‌ها مطالعه‌ای انجام نداده‌اند.

نظر به مطالعات پیشین در خصوص سیلوه‌ها و پوسته‌های فولادی، رفتار کمانشی سیلوه‌های حلقوی تاکنون مورد ارزیابی قرار نگرفته است. از این رو، مطالعه حاضر تأثیر حلقه‌های پیرامونی بر ظرفیت کمانشی و حساسیت به نقص این سیلوه‌ها تحت فشار محوری را مورد بررسی قرار می‌دهد. با انجام تحلیل‌های خطی و غیرخطی و مطالعات پارامتری، به این پرسش پاسخ داده می‌شود که چگونه افزودن حلقه‌های مارپیچ پیرامونی می‌تواند بر عملکرد کمانشی این نوع سیلوه‌ها تأثیر بگذارد. همچنین، مقایسه‌ای بین سیلوه‌های حلقوی و سیلوه‌های ورق صاف با ضخامت

<sup>1</sup> ANSYS

<sup>2</sup> Slender

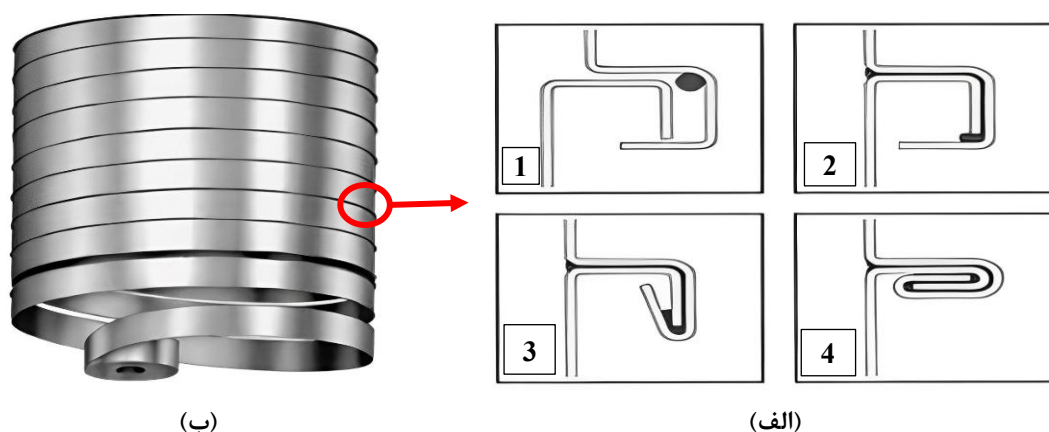
<sup>3</sup> Intermediate

<sup>4</sup> Squat

<sup>5</sup> Artificial neural networks

<sup>6</sup> Xaver Lipp

معادل نیز انجام شده است. نوآوری اصلی این پژوهش، بررسی اثر زاویه رینگ‌های مارپیچ بر عملکرد کمانشی سیلوها، ارزیابی حساسیت به نقص هندسی تحت مدهای کمانش و مقایسه کمی عملکرد سیلوه‌های حلقوی با سیلوه‌های ورق صاف معادل تحت شرایط وزنی برابر است؛ موضوعی که در مطالعات پیشین به آن پرداخته نشده است.



شکل ۱. (الف) نحوه شکل‌گیری سخت‌کننده‌های مارپیچ پیرامونی و (ب) شکل شماتیک سیلوه‌های حلقوی [۱۸]

جدول ۱. تحلیل‌های بکار رفته براساس آئین نامه اروپا [۱۳]

نام تحلیل (به فارسی)	نام تحلیل (به انگلیسی)	نوع تئوری	هندسه پوسته
تحلیل کمانش خطی سیلوها	Linear Bifurcation Analysis (LBA)	خمش و ارتجاع خطی	بدون نقص هندسی
تحلیل کمانش غیر خطی هندسی و مصالح سیلوها	Geometrically and materially non-linear analysis (GMNA)	غیر خطی	بدون نقص هندسی
تحلیل کمانش غیر خطی هندسی و مصالح سیلوها همراه با نقص هندسی	Geometrically and materially non-linear imperfection analysis (GMNIA)	غیر خطی	با نقص هندسی

جدول ۲. پارامترهای بکار رفته در مطالعه حاضر

نمادها	شرح	واحد
t	ضخامت سیلو	متر (m)
r	شعاع داخلی سیلو	متر (m)
D	قطر داخلی سیلو	متر (m)
H	ارتفاع سیلو	متر (m)
W	دامنه نقص	متر (m)
F <sup>Spiral</sup>	ظرفیت کمانشی سیلوی حلقوی	کیلونیوتن (kN)
F <sup>No-Rings</sup>	ظرفیت کمانشی سیلوه‌های حلقوی بدون حلقه‌های محیطی	کیلونیوتن (kN)
F <sup>Equivalent</sup>	ظرفیت کمانشی سیلوه‌های ورق صاف معادل	کیلونیوتن (kN)

## ۲- مدل سازی المان محدود

به منظور بررسی رفتار سیلوهای حلقوی، یک نمونه واقعی<sup>۱</sup> با مشخصات ارائه شده در جدول ۳ در نظر گرفته شد. در این جدول H ارتفاع، D قطر، r شعاع و t ضخامت سیلو است. لازم به توضیح است که نسبت ابعادی (H/D) نمونه انتخاب شده، بر اساس آئین نامه اروپا [۸]، در دسته با لاغری میانی<sup>۲</sup> قرار دارد که دسته کاربردی در سیلوها به شمار می رود. برای مدل سازی سیلوی مورد نظر از نرم افزار المان محدود آباکوس<sup>۳</sup> [۲۰]، استفاده شده است. کلیه تحلیل های انجام شده در این پژوهش با انجام مطالعه همگرایی مش (مطابق با جدول ۴، همچنین تعاریف تحلیل های خطی و غیرخطی در بخش ۴ ارائه شده است) همراه بودند. بر اساس نتایج این مطالعات، اندازه مش در جهت های ارتفاعی و پیرامونی، برابر با ۰/۲ متر تعیین گردید (شکل ۲). جداره سیلو به وسیله المان های پوسته چهار گره ای دابل انحنای ساخته شده است. همچنین جهت مدل سازی حلقه های مارپیچ پیرامونی از المان های آجری<sup>۵</sup>، استفاده شد. پیوستگی بین حلقه ها و جداره از طریق قید بستن<sup>۶</sup> ایجاد گردید. در این قید، سطوح داخلی حلقه ها به عنوان سطح چیره<sup>۷</sup> و سطح خارجی سیلو به عنوان سطح مغلوب<sup>۸</sup> در نظر گرفته شد. مقطع حلقه ها به صورت مستطیل به عرض ۴ سانتی متر و ارتفاعی پنج برابر ضخامت ورق های فولادی، منطبق بر نمونه سیلوی واقعی ساخته شد.

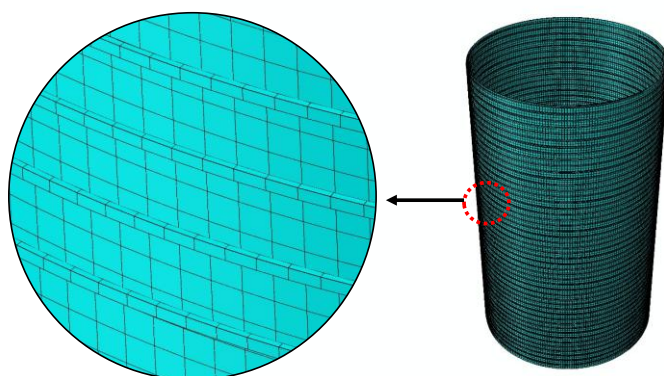
جدول ۳. مشخصات هندسی سیلوی مورد مطالعه

Aspect ratio range	Silo slenderness category	H/r	r/t	H (m)
1.0 < H/D < 2.0	Intermediate slender	3.375	500	27

جدول ۴. نمونه مطالعه همگرایی مش برای مدل سیلو با زاویه رینگ ۵/۰ درجه

Mesh Size (m)	FLBA (kN)	Rel. error* (0.2 mesh)	FGMNA (kN)	Rel. error* (0.2 mesh)
0.5	2.92E+05	-	2.65E+05	-
0.25	2.64E+05	11%	2.46E+05	8%
0.2	2.61E+05	1%	2.44E+05	1%

$$*Error \% = |F_{Finner\ mesh} - F_{Coarser\ mesh}| / [(F_{Finner\ mesh} + F_{Coarser\ mesh}) / 2]$$



شکل ۲. نحوه مش بندی سیلو و رینگ های حلقوی پیرامونی

<sup>1</sup> AGICO CEMENT-China

<sup>2</sup> Intermediate Silo

<sup>3</sup> Abaqus

<sup>4</sup> S4R

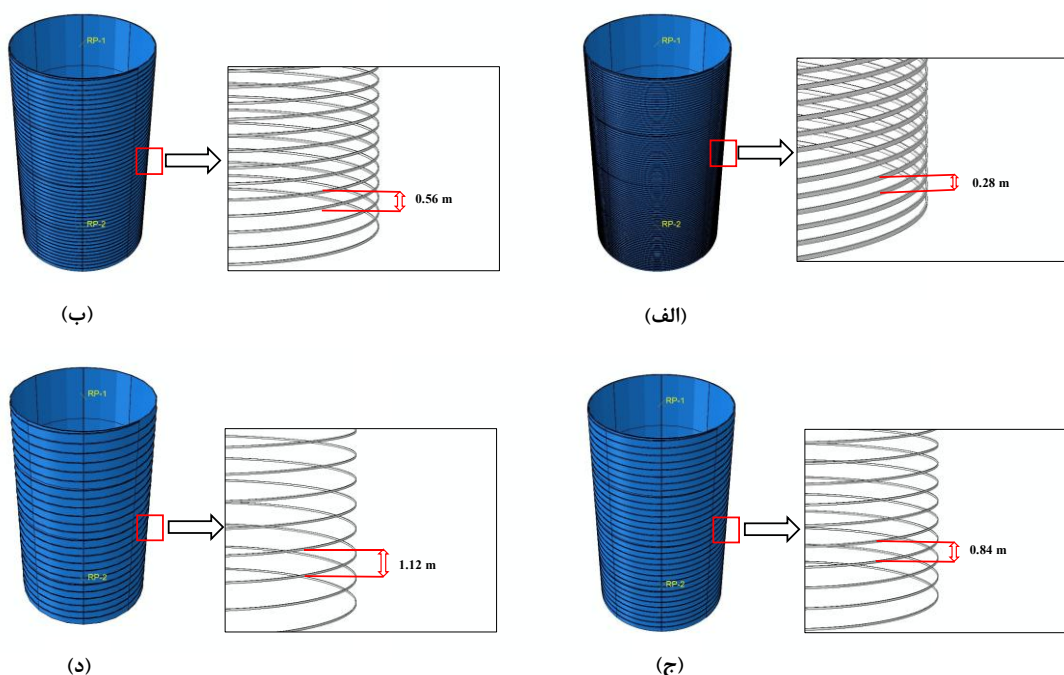
<sup>5</sup> C3D8R

<sup>6</sup> Tie constraint

<sup>7</sup> Master

<sup>8</sup> Slave

برای تعریف شرایط تکیه‌گاهی در نرم‌افزار آباکوس، لبه‌های بالایی و پایینی سیلو از طریق قید بستن (Tie) و به صورت Rigid Body به نقاط مرجع<sup>۱</sup> RP-1 و RP-2 در مرکز سیلو متصل شده‌اند. در این پژوهش، شرایط تکیه‌گاهی و بارگذاری از طریق این نقاط مرجع اعمال شده است. به طوریکه پای سیلو به صورت کاملاً گیردار در نظر گرفته شده و قسمت بالایی سازه نیز به گونه‌ای مدل‌سازی شده که اجازه‌ی حرکت آزاد در راستای قائم و دوران حول محورهای افقی را داشته باشد. فاصله‌ی حلقه‌ها و همچنین تعداد آن‌ها در ارتفاع سیلو، تابعی از زاویه آن‌ها با افق است. به همین منظور، جهت بررسی تأثیر زاویه حلقه‌های پیرامونی بر ظرفیت کمانشی سیلوهای حلقوی، زوایای ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درجه در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که در مدل‌سازی حلقه‌های پیرامونی و بدنه سیلو، رفتار الاستوپلاستیک بدون سخت‌شوندگی با مقاومت جاری شدن ۳۴۰ مگاپاسکال برای فولاد در نظر گرفته شد. همچنین برای فولاد مصرفی، مقادیر مدول الاستیسیته  $2 \times 10^5$  مگاپاسکال و نسبت ضریب پواسون ۰/۳ است. تمام سیلوهای مدل شده در شکل (۳) نمایش داده شده است.



شکل ۳. سیلوهای حلقوی با زوایای (الف) ۰/۵، (ب) ۱، (ج) ۱/۵ و (د) ۲ درجه

همان‌طور که در شکل ۲ به وضوح مشاهده می‌شود، تغییر زاویه حلقه‌های پیرامونی تأثیر قابل توجهی بر هندسه کلی سیلو دارد. با افزایش زاویه، فاصله بین حلقه‌ها در جهت ارتفاع افزایش یافته و در نتیجه، تعداد کل حلقه‌ها در ارتفاع سیلو کاهش می‌یابد. همچنین به منظور توضیح دقیق‌تر، گام ارتفاعی حلقه‌ها برای زوایای ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درجه، به ترتیب ۰/۲۸، ۰/۵۶، ۰/۸۴ و ۱/۱۲ متر است.

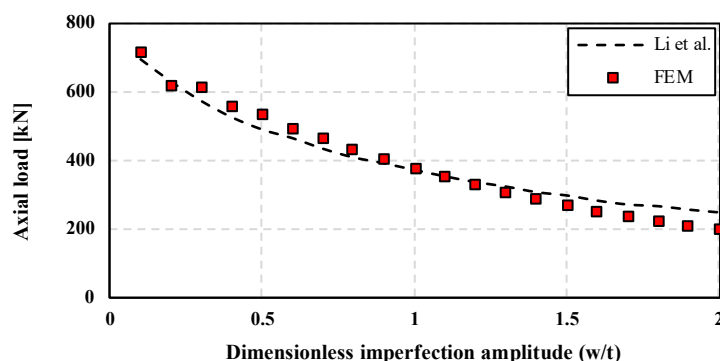
### ۳- درستی آزمایشی مدل‌ها

به منظور اعتبارسنجی روش‌های تحلیل خطی و غیرخطی صورت گرفته در مطالعه حاضر، نتایج پژوهش ژنگ لی و همکاران [۱] در کمانش محوری پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده با سخت‌کننده‌های پیرامونی، مورد مقایسه قرار گرفته است. مشخصات هندسی نمونه پوسته فولادی تقویت‌شده با هفت سخت‌کننده پیرامونی (شکل ۴ (الف))، عبارت است از: ارتفاع ۶۲۰ میلی‌متر، شعاع ۷۹۶ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر. سخت‌کننده‌های پیرامونی دارای مقطع مربعی شکل به ابعاد ۸ میلی‌متر و گام ارتفاعی برابر با ۹۷/۶ میلی‌متر<sup>۲</sup> هستند. لازم به ذکر است که مدول یانگ و تنش تسلیم برای پوسته اصلی به ترتیب ۲۰۰ گیگاپاسکال و ۶۰۰ مگاپاسکال است، در حالی که این مقادیر برای سخت‌کننده‌های پیرامونی به ترتیب ۲۱۰ گیگاپاسکال و ۳۴۰ مگاپاسکال است. مقایسه منحنی حساسیت به نقص اولیه (W دامنه نقص است

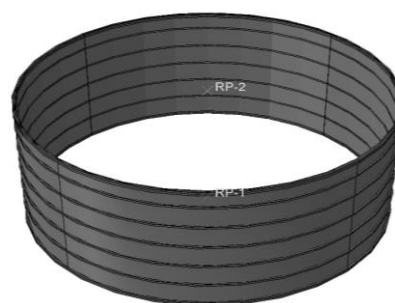
<sup>۱</sup> Reference Point

<sup>۲</sup> One wavelength ( $3.46 \times \sqrt{r t}$ )

که به صورت مد اول کمانش اعمال شده است)، نشان دهنده همخوانی مناسب نتایج عددی حاصل از مطالعه حاضر، با نتایج گزارش شده در پژوهش ژنگ لی و همکاران است (شکل ۴ (ب)).



(ب)



(الف)

شکل ۴. مقایسه نتایج عددی حاصل از تحلیل المان محدود با نتایج پژوهش مرجع: (الف) شکل شماتیک پوسته مورد مطالعه و (ب) منحنی حساسیت به نقص

#### ۴- یافته‌ها و تفسیر نتایج

در این قسمت، رفتار خطی و غیرخطی سیلوهای فولادی حلقوی با زوایای متفاوت با استفاده از تحلیل کمانش خطی<sup>۱</sup> و تحلیل غیرخطی هندسی و مصالح<sup>۲</sup> منطبق بر الزامات آئین نامه EN 1993-1-6 [۱۳]، مورد بررسی قرار می‌گیرد. با استفاده از تحلیل کمانش خطی، مقدار ویژه<sup>۳</sup> و بردار ویژه<sup>۴</sup> متناظر با آن به عنوان بار کمانشی و مد کمانش، تعیین می‌شود. سپس، با در نظر گرفتن تأثیرات غیرخطی هندسی و مصالح، با دنبال کردن رفتار کمانشی افزایشی<sup>۵</sup> سازه از طریق الگوریتم ریگس<sup>۶</sup> (با استفاده از حل گر ضمنی)، مقدار بار بحرانی تعیین می‌گردد. همچنین، تأثیر نقص هندسی به فرم مد اول کمانش<sup>۷</sup> بر رفتار غیرخطی سیلوها نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به توضیح است که دامنه نقص هندسی<sup>۸</sup> به کمک روابط موجود در آئین نامه اروپا [۱۲]، که برای تعیین کیفیت کلاس ساخت<sup>۹</sup> سیلوها است، در نظر گرفته شده است. در نهایت، ظرفیت کمانشی سیلوهای حلقوی با سیلوهای دارای ضخامت معادل (حاصل از تبدیل حلقه‌ها به ضخامت یکنواخت اضافی) مورد مقایسه قرار می‌گیرد. به منظور اعمال بارگذاری در هر دو نوع تحلیل خطی و غیرخطی از بار متمرکز بر نقطه مرجع (RP-1) در بالای سیلو استفاده شده است.

#### ۴-۱- تحلیل کمانش خطی

تحلیل کمانش خطی، روشی متداول برای پیش‌بینی بار کمانش و شکل مدهای کمانش یک سازه به شمار می‌رود [۲۱]. این روش که تحت عنوان آنالیز مقدار ویژه<sup>۱۰</sup> نیز شناخته می‌شود، با حل مسئله‌ی مقدار ویژه تعمیم‌یافته<sup>۱۱</sup>، بار کمانش را تحت عنوان مقدار ویژه و شکل مود کمانش متناظر را نیز به عنوان بردار ویژه تعیین می‌کند. همان‌طور که در بخش مدل‌سازی المان محدود ذکر شد، چهار مدل به منظور بررسی تأثیر زاویه حلقه‌های پیرامونی بر ظرفیت کمانشی سیلوهای حلقوی ایجاد گردید. برای انجام تحلیل LBA، بار واحد متمرکزی به لبه بالایی سیلوها اعمال گردید. نتایج حاصل از این تحلیل، شامل بار کمانش و مدهای اول کمانشی برای هر یک از سیلوهای حلقوی در شکل ۵

<sup>1</sup> Linear Bifurcation Analysis (LBA)

<sup>2</sup> Geometrically and materially non-linear analysis (GMNA)

<sup>3</sup> Eigen value

<sup>4</sup> Eigen mode

<sup>5</sup> incremental buckling behavior

<sup>6</sup> Riks

<sup>7</sup> 1<sup>st</sup> buckling mode shape

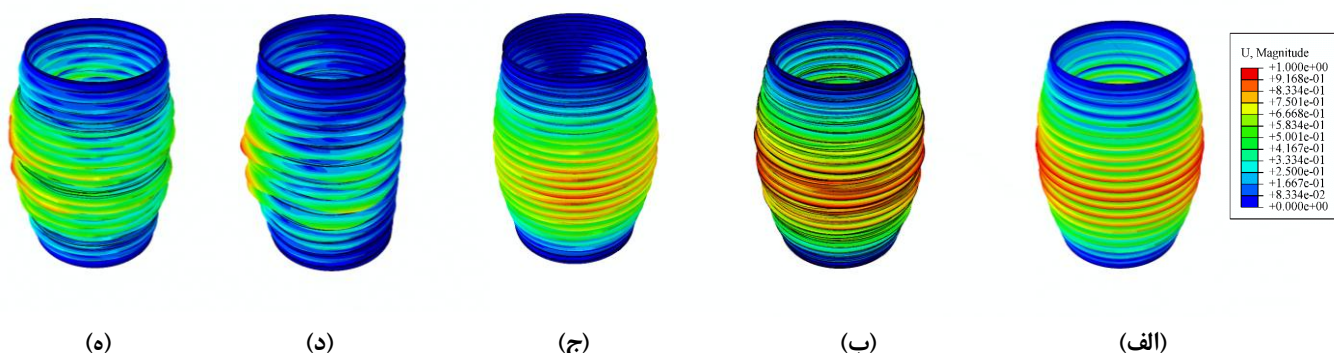
<sup>8</sup> Imperfection amplitude

<sup>9</sup> Fabrication Quality Class (FQC)

<sup>10</sup> Eigenvalue analysis

<sup>11</sup> Generalized eigen-value solution

و جدول ۴ ارائه شده است. همچنین لازم به توضیح است که در این بخش مقایسه‌ای نیز میان سیلوه‌های حلقوی و سیلوی بدون حلقه‌های پیرامونی صورت گرفته است.



شکل ۵. مد اول کمانش خطی در سیلوه‌های (الف) بدون سخت‌کننده‌های پیرامونی و با سخت‌کننده‌های مارپیچ با زوایای (ب) ۰/۵، (ج) ۱، (د) ۱/۵ و (ه) ۲ درجه

همان‌گونه که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود، مد اول کمانشی سیلوی بدون حلقه‌های پیرامونی تحت فشار محوری کاملاً متقارن بوده و به مد کمانشی سیلوه‌های حلقوی با زاویه‌های ۰/۵ و ۱ درجه شباهت زیادی دارد. با این حال، شکل مد کمانشی در سیلوه‌های حلقوی نسبت به سیلوی بدون حلقه، اندکی از حالت تقارن خارج می‌شود. با افزایش زاویه حلقه‌ها، میزان عدم تقارن در شکل‌های مد کمانشی به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد.

جدول ۵. مقایسه بار کمانش سیلوه‌های حلقوی و سیلوی بدون حلقه‌های پیرامونی (تحلیل خطی)

Rings angle	FLBA-Spiral (kN)	$\frac{F_{LBA-Spiral}}{F_{LBA(No-Rings)}}$
No-Rings	1.95E+05	1
0.5°	2.61E+05	1.34
1°	2.13E+05	1.09
1.5°	2.10E+05	1.08
2°	2.08E+05	1.07

نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که با کاهش زاویه حلقه‌های پیرامونی نسبت به افق، ظرفیت کمانشی سیلوه‌های حلقوی به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. حداکثر افزایش ظرفیت کمانشی در زاویه ۰/۵ درجه مشاهده می‌شود که حدود ۳۴ درصد بیشتر از سیلوی بدون حلقه است. این امر نشان‌دهنده تأثیر مثبت حلقه‌های پیرامونی بر مقاومت کمانشی سیلوه‌ها است. با افزایش زاویه حلقه‌ها، ظرفیت کمانشی کاهش یافته و کمترین مقدار آن در زاویه ۲ درجه مشاهده می‌شود. بنابراین، تحلیل مقایسه‌ای نشان می‌دهد که حلقه‌های پیرامونی با زاویه کمتر، به دلیل افزایش تعداد و کاهش فاصله بین آن‌ها، تأثیر بیشتری در تقویت سازه دارند.

#### ۴-۱- تحلیل کمانش غیرخطی هندسی و مصالح

در قسمت پیشین، تحلیل خطی به منظور شناسایی فرم مد اول کمانش و تعیین ظرفیت باربری سیلوه‌ها انجام شد. در این بخش، با هدف بررسی دقیق‌تر رفتار کمانشی، تحلیل غیرخطی هندسی و مصالح سیلوه‌های حلقوی تحت فشار محوری مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور، جهت ارزیابی تأثیر حلقه‌های پیرامونی، منحنی‌های بار-جابجایی برای زوایای مختلف حلقه‌ها استخراج گردید (شکل ۶). در این نمودارها، نسبت ظرفیت باربری غیرخطی به ظرفیت باربری خطی<sup>۱</sup> در مقابل جابجایی محوری<sup>۲</sup> سیلوه‌ها نمایش داده شده است. علاوه بر

<sup>۱</sup> Load Proportionality Factor (LPF)

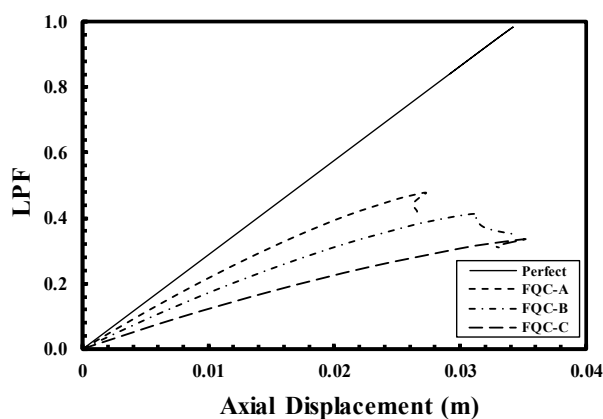
<sup>۲</sup> Axial displacement

این، تأثیر نقص هندسی بر رفتار کمانشی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، شکل نقص هندسی مطابق با فرم مد اول کمانش حاصل از تحلیل خطی منطبق بر پیشنهاد آئین نامه اروپا [۱۳] در نظر گرفته شده است و دامنه نقص نیز بر اساس کیفیت کلاس های ساخت تعریف شده در استاندارد اروپا [۱۲]، تعیین گردید. این استاندارد سه کلاس ساخت را تحت عنوان عالی<sup>۱</sup>، خوب<sup>۲</sup> و معمولی<sup>۳</sup> تعریف می کند و دامنه نقص ( $W_{ok}$ ) برای هر کلاس با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می شود.

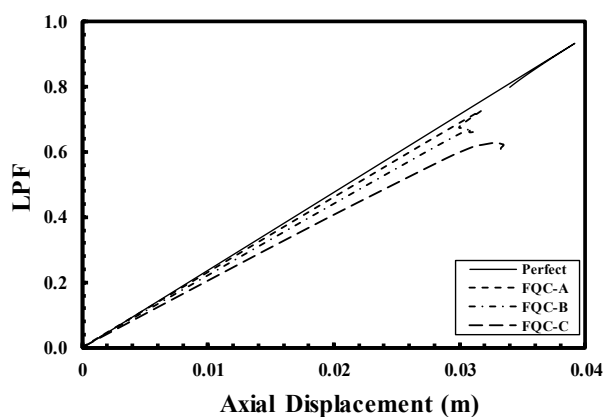
$$W_{ok} = \frac{t}{Q} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}} \quad (1)$$

در رابطه ۱،  $t$  و  $r$  به ترتیب ضخامت و شعاع پوسته است. همچنین پارامتر  $Q$  مطابق با الزامات آئین نامه تعیین می شود. هر میزان کیفیت ساخت کم شود (از کلاس ساخت عالی به معمولی)، مقدار  $Q$  نیز کاهش می یابد. این امر منجر به افزایش دامنه نقص هندسی می شود که از نظر ایمنی سازه، مطلوب نیست. مقادیر پیشنهادی برای پارامتر  $Q$  در کلاس های ساخت مختلف به شرح زیر است:

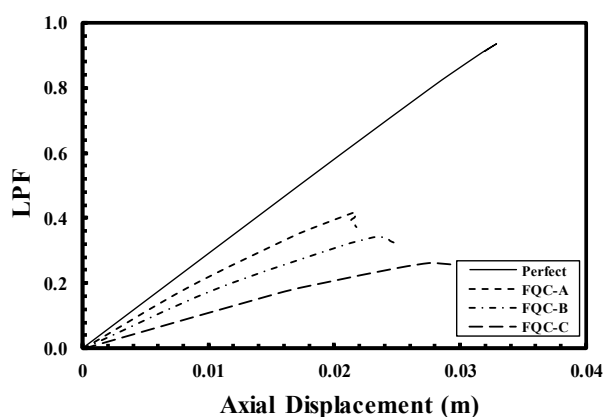
- کلاس ساخت عالی (FQC-A):  $Q=40$
- کلاس ساخت خوب (FQC-B):  $Q=25$
- کلاس ساخت معمولی (FQC-C):  $Q=16$



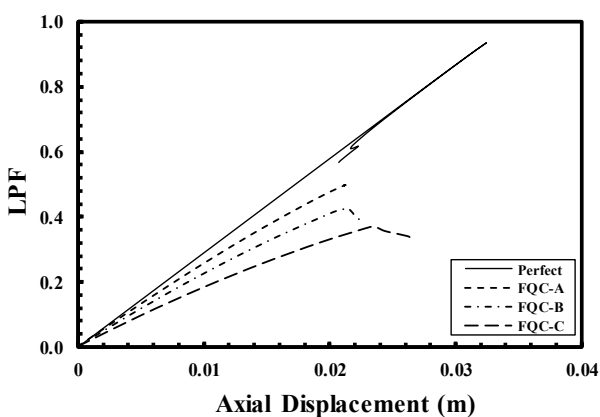
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

<sup>1</sup> Excellent quality

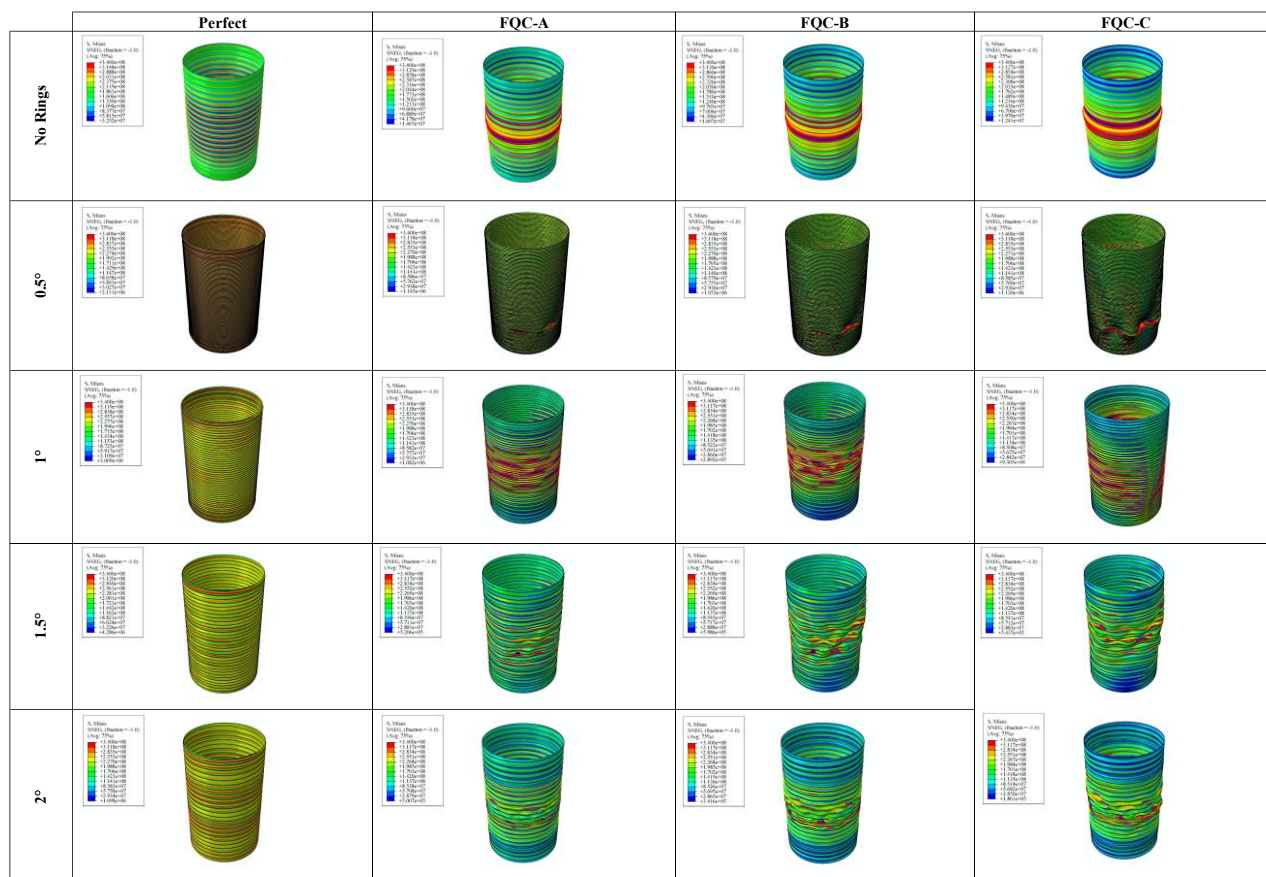
<sup>2</sup> High quality

<sup>3</sup> Normal quality

<sup>4</sup> Fabrication tolerance quality of construction of a shell susceptible to buckling

شکل ۶. منحنی بار - جابه‌جایی سیلوه‌های حلقوی برای زوایای (الف) ۰/۵، (ب) ۱، (ج) ۱/۵ و (د) ۲ درجه

نمودارهای بار-جابه‌جایی ارائه شده در شکل ۶، رفتار دوشاخگی<sup>۱</sup> را نشان می‌دهد. در حالت بدون نقص هندسی پس از رسیدن به نقطه‌ی بیشینه ظرفیت، برگشت بسیار تند در مسیر بار مشاهده می‌شود. با اعمال نقص هندسی، ضمن کاهش در تراز ظرفیت باربری، رفتار پس‌کمانش<sup>۲</sup> هموارتر شده و از برگشت روی مسیر اولیه بارگذاری فاصله می‌گیرد. مطابق شکل، سیلوه‌های حلقوی با زاویه حلقه ۰/۵ درجه، در مقایسه با سایر زوایا، بالاترین ظرفیت باربری را دارند. همچنین منحنی‌های متناظر با سیلوی ۰/۵ درجه، در شرایط با و بدون نقص هندسی، به یکدیگر نزدیک‌تر بوده که نشان می‌دهد این نوع سیلو در برابر نقص هندسی، حساسیت کمتری نسبت به سایر سیلوه‌ها دارند.



شکل ۷. فرم کمانش یافته سیلوه‌ها و توزیع تنش‌ها بر حسب پاسکال در لحظه کمانش برای زوایای مختلف (ضریب بزرگ‌نمایی = ۳۰)

همان‌گونه که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، در سیلوه‌های حلقوی کمانش به صورت موضعی<sup>۳</sup> و عمدتاً در نواحی بین حلقه‌ها رخ می‌دهد. مطابق شکل، نواحی میانی ارتفاع سیلو عموماً دچار کمانش شده است. با افزایش زاویه حلقه‌ها، تعداد موج‌های کمانشی محیطی نیز افزایش می‌یابند؛ بنابراین زاویه حلقه‌های پیرامونی به طور مستقیم بر تعداد موج‌های کمانش و الگوی کلی کمانش تأثیرگذار است. همچنین، وجود نقص هندسی باعث افزایش نامتقارنی در الگوی کمانش و افزایش تعداد موج‌ها شده است. در مقابل، سیلوی بدون حلقه، کمانش متقارن از نوع فشار محوری را تجربه می‌کند. در قسمت‌های میانی، به سبب توسعه پلاستیته، فرم کمانشی به کمانش زانو فیلی تمایل یافته است. نتایج تحلیل غیرخطی ارائه شده در جدول ۶ نشان می‌دهد که سیلوه‌های حلقوی با زاویه حلقه ۰/۵ درجه، چه در شرایط ایده‌آل (بدون نقص

<sup>۱</sup> Bifurcation<sup>۲</sup> Post-buckle<sup>۳</sup> Local buckling

هندسی) و چه در حضور نقص‌های اولیه، بالاترین ظرفیت باربری کمانشی را از خود نشان می‌دهند (۱/۷ برابر ظرفیت کمانشی سیلوی فاقد حلقه‌های پیرامونی). این امر عمدتاً به دلیل فاصله کم و تعداد زیاد حلقه‌های تقویت‌کننده در اطراف جداره سیلو است. همچنین، این نوع سیلوه‌ها کمترین حساسیت را نسبت به وجود نقص‌های هندسی از خود نشان می‌دهند. در مقابل، سیلوه‌های با زاویه حلقه ۲ درجه، کمترین مقاومت کمانشی را دارا هستند. مقایسه نتایج برای این دو زاویه در حالت بدون نقص، کاهش حدود ۲۰ درصدی را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن اینکه در شرایط واقعی، تمام سازه‌ها دارای نقص‌های هندسی ناشی از فرآیند ساخت هستند، مقایسه نتایج برای حالت با نقص -FQC-B، کاهش چشمگیر حدود ۱/۵ برابری در ظرفیت باربری سیلوه‌های با زاویه ۲ درجه نسبت به سیلوه‌های با زاویه ۰/۵ درجه را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج حاصل از سیلوه‌های با زوایای ۱ و ۱/۵ درجه نشان می‌دهد که در شرایط بدون نقص، سیلوی با زاویه ۱ درجه ظرفیت باربری بالاتری دارد. با این حال، با اعمال نقص‌های هندسی، این روند معکوس شده و سیلوی با زاویه ۱/۵ درجه مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. این تفاوت به دلیل اختلاف در شکل مد اولیه کمانش اعمال‌شده به عنوان نقص هندسی در هر دو سیلو است که منجر به تغییر در ظرفیت کمانشی آن‌ها می‌شود.

جدول ۶. خلاصه نتایج ظرفیت کمانش سیلوه‌های حلقوی (تحلیل غیرخطی)

Spiral silo rings angle	Fabrication Quality Class			
	F <sup>Spiral-Perfect</sup>	F <sup>Spiral (FQC-A)</sup>	F <sup>Spiral (FQC-B)</sup>	F <sup>Spiral (FQC-C)</sup>
No Rings	1.44E+05	9.28E+04	7.69E+04	6.00E+04
0.5°	2.44E+05	1.90E+05	1.75E+05	1.64E+05
1°	2.09E+05	1.02E+05	8.81E+04	7.12E+04
1.5°	1.96E+05	1.05E+05	9.00E+04	7.77E+04
2°	1.95E+05	8.68E+04	7.09E+04	5.47E+04

#### ۴-۳- معادل سازی سیلوه‌های حلقوی با سیلوه‌های بدون حلقه (ورق صاف)

در بخش حاضر، به بررسی این موضوع پرداخته می‌شود که جایگزینی حلقه‌های پیرامونی با لایه‌های با ضخامت یکنواخت، منجر به چه تغییری در ظرفیت کمانشی سیلوه‌ها می‌شود. بدین منظور، حجم معادل حلقه‌های پیرامونی، به صورت یک لایه یکنواخت بر روی جداره سیلوه‌ها توزیع شده است. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش زاویه حلقه‌ها و افزایش تعداد آن‌ها، وزن و حجم سیلو به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه، وزن سیلوی حلقوی با زاویه ۰/۵ درجه، تقریباً دو برابر یک سیلوی بدون حلقه است (جدول ۷).

جدول ۷. خلاصه‌ای از وزن و حجم سیلوه‌های حلقوی و ضخامت معادل حلقه‌های پیرامونی

Rings angle	Silo weight (tons)	Silo volume (m <sup>3</sup> )	Rings volume (m <sup>3</sup> )	Equivalent silo thickness (m)
No Rings	170.8	21.8	0	0.016
0.5°	292.6	37.3	15.5	0.027
1°	231.7	29.5	7.8	0.022
1.5°	211.4	26.9	5.2	0.020
2°	201.2	25.6	3.9	0.019

با مقایسه نتایج تحلیل‌های خطی و غیرخطی در شرایط بدون نقص هندسی (جدول ۸)، مشاهده می‌شود که سیلوه‌های ورق صاف معادل، ظرفیت کمانشی بالاتری نسبت به سیلوه‌های حلقوی دارند. به طور مشخص، با افزایش زاویه حلقه‌ها از ۰/۵ به ۲ درجه، ظرفیت کمانشی سیلوه‌های حلقوی به ترتیب ۴۰، ۳۴، ۲۸ و ۲۵ درصد کاهش مقاومت نسبت به سیلوه‌های ورق صاف معادل خواهند داشت. با اعمال نقص هندسی ناشی از کلاس ساخت (جدول ۹)، سیلوه‌های حلقوی با زاویه ۰/۵ درجه ظرفیت کمانشی بیشتری نسبت به سیلوی ورق صاف معادل نشان می‌دهند؛ که این امر حاکی از آن است که وجود حلقه‌ها، به ویژه در زاویه‌های کم، می‌تواند میزان حساسیت سازه را نسبت به نقص هندسی بهبود دهد.

جدول ۸. ظرفیت کمانشی خطی و غیرخطی سیلوهای معادل در حالت ایده آل (بدون نقص)

Equivalent silo thickness (m)	$F_{LBA-Equivalent}$ (kN)	$F_{LBA-Spiral}$	$F_{GMNA-Equivalent}$ (kN)	$F_{GMNA-Spiral}$
		$F_{LBA-Equivalent}$		$F_{GMNA-Equivalent}$
0.027	5.57E+05	0.47	4.08E+05	0.6
0.022	3.69E+05	0.58	3.17E+05	0.66
0.020	3.05E+05	0.69	2.73E+05	0.72
0.019	2.75E+05	0.75	2.58E+05	0.75

جدول ۹. خلاصه نتایج ظرفیت کمانش سیلوهای ورق صاف معادل به همراه نقص‌های هندسی (تحلیل غیرخطی)

Equivalent silo thickness (m)	Fabrication Quality Class					
	$F_{Equivalent}$ (FQC-A)	$F_{Spiral}$ (FQC-A)	$F_{Equivalent}$ (FQC-B)	$F_{Spiral}$ (FQC-B)	$F_{Equivalent}$ (FQC-C)	$F_{Spiral}$ (FQC-C)
		$F_{Equivalent}$ (FQC-A)		$F_{Equivalent}$ (FQC-B)		$F_{Equivalent}$ (FQC-C)
0.027	1.85E+05	1.02	1.69E+05	1.04	1.36E+05	1.21
0.022	1.57E+05	0.65	1.25E+05	0.71	9.92E+04	0.72
0.020	1.33E+05	0.79	1.08E+05	0.83	8.44E+04	0.92
0.019	1.22E+05	0.71	9.99E+04	0.71	8.06E+04	0.68

## ۵- نتیجه گیری

- در این پژوهش رفتار کمانشی سیلوهای حلقوی تحت فشار محوری مورد بررسی قرار گرفته است و تأثیر پارامترهای زاویه حلقه‌های پیرامونی و حساسیت به نقص هندسی بر عملکرد آن‌ها ارزیابی شده است. یافته‌های این پژوهش به شرح زیر ارائه می‌شود:
۱. حلقه‌های پیرامونی، حاصل فرآیند ساخت سیلوهای حلقوی، موجب افزایش ظرفیت کمانش محوری این نوع سازه‌ها می‌شوند. برای نمونه سیلوی با زاویه حلقه ۰/۵ درجه نسبت به سیلوی بدون حلقه تا حدود ۷۰ درصد افزایش مقاومت از خود نشان می‌دهد. بنابراین، می‌توان اثر مثبت حاصل از این حلقه‌ها را در محاسبات و طراحی در نظر گرفت.
  ۲. افزایش زاویه حلقه‌ها، سبب کاهش تعداد آن‌ها و در نتیجه کاهش ظرفیت باربری سیلوه‌ها می‌شود. بنابراین، بیشترین ظرفیت باربری در زاویه ۰/۵ درجه و کمترین آن در زاویه ۲ درجه مشاهده شده است.
  ۳. برای بررسی میزان حساسیت به نقص این نوع سیلوه‌ها، از فرم مد اول کمانش خطی استفاده شد. نتایج حاکی از آن است که سیلو با زاویه حلقه ۲ درجه نسبت به سایر حالات، حساسیت بیشتری به نقص هندسی از خود نشان می‌دهد. این امر به دلیل افزایش فاصله بین حلقه‌ها در زوایای بالاتر است.
  ۴. نمودارهای بار-جابجایی رفتار کمانشی دوشاخگی از خود نشان می‌دهند. با اعمال نقص هندسی، ضمن کاهش تراز باربری، مسیر بار هموارتری پس از نقطه دوشاخگی بدست می‌آید. همچنین در بررسی فرم کمانشی، کمانش به صورت موضعی و عمدتاً در ارتفاع میانی سیلو، در نواحی بین حلقه‌ها رخ می‌دهد. با افزایش زاویه حلقه‌ها، تعداد موج‌های کمانشی محیطی نیز افزایش می‌یابند.
  ۵. سیلوهای حلقوی با سیلوهای ورق صاف معادل مورد مقایسه قرار گرفتند. اگرچه سیلوهای ورق صاف معادل مقاومت بیشتری را نسبت به نمونه سیلوهای حلقوی در حالت بدون نقص از خود نشان می‌دهند؛ اما در تحلیل‌های حساسیت به نقص، سیلوهای حلقوی حساسیت کمتری نسبت به اعمال نقص از خود نشان دادند. حتی در نمونه سیلوهای با زاویه کم، مقاومت کمانشی بیشتری نیز حاصل شده است. به طور مشخص سیلوی با زاویه ۰/۵ درجه در کلاس ساخت معمولی (FQC-C)، ۱/۲ برابر مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد.

## مراجع

- [1] Li, Z. Pasternak, H. and Jäger-Cañás, A. (2021). “*Buckling of ring-stiffened cylindrical shell under axial compression: Experiment and numerical simulation*”, Thin-Walled Structures, Volume 164, Pages (1-11).
- [2] Wagner, H. Hühne, C. Niemann, S. Tian, K. Wang, B. and Hao, P. (2018). “*Robust knockdown factors for the design of cylindrical shells under axial compression: Analysis and modeling of stiffened and unstiffened cylinders*”, Thin-Walled Structures, Volume 127, Pages (629–645).
- [3] Castro, S. Zimmermann, R. Arbelo, M. Khakimova, R. Hilburger, M. and Degenhardt, R. (2014). “*Geometric imperfections and lower-bound methods used to calculate knock-down factors for axially compressed composite cylindrical shells*”, Thin-Walled Structures, Volume 74, Pages (118–132).
- [4] Pasternak, H. Li, Z. Juozapaitis, A. and Daniūnas, A. (2022). “*Ring Stiffened Cylindrical Shell Structures: State-of-the-Art Review*”, Applied Sciences (Switzerland), 12(22).
- [5] Wang, B. Du, K. Hao, P. Zhou, C. Tian, K. Xu, S. Ma, Y. and Zhang, X. (2016). “*Numerically and experimentally predicted knockdown factors for stiffened shells under axial compression*”, Thin-Walled Structures, Volume 109, Pages (13–24).
- [6] Wang, P. Zhu, X. Liu, M. and Li, Y. (2017). “*Buckling behaviors and simplified design method for steel silos under locally distributed axial load*”, Journal of Constructional Steel Research, Volume 134, Pages (114–134).
- [7] Sadowski, A.J. and Rotter, J.M. (2011). “*Steel silos with different aspect ratios: I - Behaviour under concentric discharge*”, Journal of Constructional Steel Research, 67(10), Pages (1537–1544).
- [8] EN 1991-4, Eurocode 1: Actions on structures – Part 4: Silos and tanks, CEN, Brussels, 2006.
- [9] Cao, Q. and Zhao, Y. (2017). “*Buckling design of large steel silos with various slendernesses*”, Journal of Zhejiang University: Science A, 18(4), Pages (282–305).
- [10] Wójcik, M. and Tejchman, J. (2015). “*Simulation of buckling process of cylindrical metal silos with flat sheets containing bulk solids*”, Thin-Walled Structures, Volume 93, Pages (122–136).
- [11] Mehrehteran, A. M. and Maleki, S. (2022). “*Axial buckling of imperfect cylindrical steel silos with isotropic walls under stored solids loads: FE analyses versus Eurocode provisions*”, Engineering Failure Analysis, Volume 137.
- [12] EN 1993-4-1, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 4-1: Silos, CEN, Brussels, 2007.
- [13] EN 1993-1-6, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-6: Strength and stability of shell structures, CEN, Brussels, 2007.
- [14] Rezaee, K. and Mehrehteran, A. M. (2024). “*Effects of cutouts on the axial buckling strength of steel thin-walled cylindrical shells*”, Engineering Structures.
- [15] Mancini, S. Tavares, D. S. Gomes, F. C. Gandia, R. M. Lacerda, W. S. Yanagi Junior, T. and De Paula, W. C. (2023). “*Use of artificial neural networks in the prediction of horizontal and friction pressures in a slender silo*”, Brazilian Journal of Development, 9(6), Pages (18761–18785).
- [16] AUSTRALIAN STANDARD AS 3774. (1996) Loads on bulk containers. Sydney. AS 3774 Supplement 1 (1996).” Loads on bulk containers – Commentary. Sydney.
- [17] Sadowski, A. J. and Filippidis, A. (2025). “*The capacity curve framework of EN 1993-1-6 (2025): Cylindrical shells under uniform meridional compression vs uniform bending*”, Journal of Constructional Steel Research, Volume 225.
- [18] Pichugin, S. and Oksenenko, K. (2019). “*Comparative analysis of design solutions of metal silos*”, ACADEMIC JOURNAL Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering, 2(53), Pages (54–60).
- [19] Pichugin, S. Oksenenko, K. Hajiyev, M. and Sulewska, M. (2021). “*Features of structures and calculation of steel spiral-fold silos*”, E3S Web of Conferences, Volume 280.
- [20] Dassault Systems, ABAQUS 6.13—Software Package, 2017.
- [21] J.P. Peterson, P. Seide, V.I. Weingarten, “*Buckling of thin-walled circular cylinders NASA SP-8007*”, Technical Report, 1 November 2020.