

## بررسی تأثیر ناکاملی بدنه اریب بر رفتار کمانشی مخازن استوانه‌ای فولادی تحت بارگذاری فشار خارجی یکنواخت

مهدی رستگار\*<sup>۱</sup> و حسین شوکتی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، واحد خوی، دانشگاه آزاد اسلامی

<sup>۲</sup> استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه

(دریافت: ۹۵/۱۱/۱۷، پذیرش: ۹۷/۴/۲۴، نشر آنلاین: ۹۷/۴/۲۴)

### چکیده

سازه‌های پوسته‌ای به دلیل پایین بودن ضخامت نسبت به دیگر ابعاد، جزو سازه‌های لاغر محسوب شده و در معرض کمانش می‌باشند. در این سازه‌ها به علت وسعت زیاد پوسته، امکان ساخت یکپارچه وجود نداشته و از تعدادی قطعات پانلی دارای اتحنا، که به یکدیگر جوش داده شده‌اند استفاده می‌گردد. به همین دلیل ناکاملی‌های هندسی مختلفی بروز می‌کنند. عمده این ناکاملی‌ها در اثر فرآیند جوشکاری، حمل‌ونقل، رولینگ نامناسب و مشکلات نصب و اجرا به وجود می‌آیند. این ناکاملی‌ها تأثیر مستقیمی در رفتار سازه‌ای پوسته‌ها به هنگام کمانش و بار فشاری خارجی دارند. با توجه به این که در اکثر مخازن پوسته‌ای در دوران بهره‌برداری امکان به وجود آمدن حالت مکش (خلأ) زیاد می‌باشد، لذا نازک بودن پوسته از یک طرف و فشاری بودن نیروهای وارده از سوی دیگر پوسته را در معرض کمانش قرار می‌دهد. در این تحقیق ناکاملی ناشی از انحراف بدنه مخزن نسبت به راستای قائم تحت عنوان ناکاملی بدنه اریب در مخازن استوانه‌ای فولادی به صورت آزمایشگاهی مدل شده و تأثیر آن بر رفتار کمانشی این مخازن تحت اثر فشار خارجی یکنواخت بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی با مقیاس مشخص مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین آنالیز المان محدود نمونه‌های آزمایشگاهی توسط نرم‌افزار ANSYS انجام شده و نهایتاً با مقایسه نتایج آزمایشگاهی، المان محدود و روابط تحلیلی تأثیر این نوع ناکاملی بر رفتار کمانشی بررسی می‌گردد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که این ناکاملی باعث کاهش امواج محیطی و افزایش مقاومت اولیه در کمانش می‌گردد.

**کلیدواژه‌ها:** رفتار کمانشی، مخازن ذخیره‌ای، ناکاملی هندسی، فشار خارجی یکنواخت.

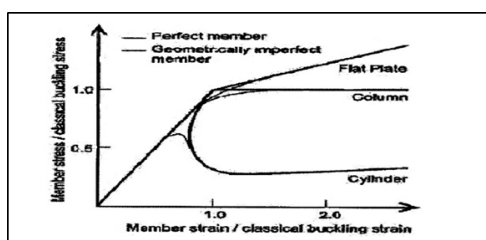
### ۱- مقدمه

مسئله ناپایداری را در آنها برجسته می‌کند. دوم این که سازه‌های پوسته‌ای در معرض نیروها و تنش‌های فشاری قرار دارند و با توجه به کم بودن ضخامت مسئله کمانش پوسته به وجود می‌آید. نوع پایداری یک سیستم سازه‌ای به پارامترهایی از قبیل خواص هندسی و مصالح و شرایط محیطی نظیر شرایط بارگذاری بستگی دارد. ناپایداری در این سازه‌ها در حالت تئوری به صورت ناپایداری نقطه دوشاخگی، ناپایداری نقطه حدی و ناپایداری دینامیکی و لرزشی می‌باشد (Farshad, ۱۹۸۳). یکی از خواص اصلی پوسته‌ها این است که در آنها سختی غشایی به مراتب بزرگ‌تر از سختی خمشی است. بر این اساس یک پوسته می‌تواند مقدار زیادی انرژی غشایی را بدون تغییر شکل زیاد جذب کند درحالی که تغییر شکل‌های زیاد و چرخش در سطح مقطع نیاز دارند که این انرژی را از طریق تغییر شکل‌های خمشی جذب نمایند با این نگرش

پوسته یک جسم جامد محصور بین دو سطح منحنی تعریف می‌گردد که فاصله این دو سطح ضخامت پوسته می‌باشد. سازه‌های پوسته‌ای سازه‌هایی هستند که شکل اولیه‌شان خمیده و ضخامت آنها بسیار کوچک‌تر از دو بعد دیگر است. در برخی حالات نسبت شعاع به ضخامت در پوسته‌ها به ۳۰۰۰ نیز می‌رسد. پوسته‌ها برخلاف صفحات به علت برخورداری از شکل خمیدگی علاوه بر نیروها و ممان‌های موجود، توانایی ایجاد نیرو را در صفحه خود برای کنش مقاومتی اولیه دارا می‌باشند. نیروهای ایجاد شده در این گونه سازه‌ها به صورت نیروهای غشایی و خمشی می‌باشد و بسته به ضخامت پوسته میدان نیروهای خمشی متغیر می‌باشد (Abramovich, ۲۰۰۲). بررسی پایداری و ناپایداری پوسته‌های جدار نازک از دو نظر اهمیت دارد. نخست این که نسبت ضخامت به ابعاد دیگر در این گونه سازه‌ها بسیار کم است و همین ویژگی

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۳۶۴۴۴۰۰۵۴

داده شده است. در این منحنی‌ها خطوط پرننگ سیستم بدون نقص هندسی را نشان می‌دهند حال آن که منحنی‌های خط‌چین رفتار متناظر سیستم ناکامل را نشان می‌دهند. همان‌گونه که دیده می‌شود المان‌های میله‌ای و صفحه‌ای به ناکاملی حساس نیستند در حالی که گنبدها که یک نمونه از سازه‌های پوسته‌ای جدار نازک می‌باشند به ناکاملی‌ها بسیار حساس هستند (Brush, ۱۹۷۵).



شکل ۲- منحنی بار محوری - تغییر مکان ستون‌ها، صفحات و پوسته‌ها در حالت‌های کامل و ناکامل

### ۳- روابط تحلیلی کمانش مخازن استوانه‌ای

معادله کلی حاکم بر پایداری پوسته‌های استوانه‌ای به صورت زیر ارائه شده است (Hornung, ۲۰۰۲):

$$D\nabla^8 w + \frac{Et}{R^2} w_{,xxxx} + \frac{1}{R} q\nabla^4 w_{,\theta\theta} = 0 \quad (1)$$

جواب عمومی این معادله به صورت زیر می‌باشد:

$$w = (c_1 \sin \lambda x + c_2 \cos \lambda x + c_3 x + c_4) \sin n\theta \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{m\pi}{L}, \quad m, n = 1, 2, 3, \dots \quad \text{به طوری که:}$$

با استفاده از شرایط مرزی، ثابت‌های  $c_1$  تا  $c_4$  به دست می‌آیند. با در نظر گرفتن شرایط انتهایی ساده برای دو انتهای پوسته استوانه‌ای و  $m=1$  و این که فشار خارجی یکنواخت اعمال شده بر سقف مخازن استوانه‌ای به صورت نیروی محوری یکنواخت بر بدنه مخازن منتقل می‌شود، بار کمانشی این مخازن تحت اثر هم‌زمان فشار خارجی یکنواخت و بار محوری از رابطه زیر به دست می‌آید (Shen, ۱۹۹۱):

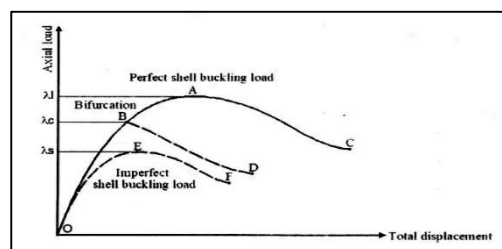
$$P_{Cr} = \frac{1}{R} \frac{(\bar{m}^2 + n^2)^4 \left(\frac{D}{R^2}\right) + \bar{m}^4 (1 - \nu^2) C}{(\bar{m}^2 + n^2)^2 (n^2 + 0.5\bar{m}^2)} \quad (3)$$

تعداد موج‌های کامل محیط استوانه به صورت زیر بیان شده است (Showkati, ۱۹۹۵):

$$n = \sqrt[4]{\frac{6\pi^2 \sqrt{1-\nu^2}}{\left(\frac{L}{R}\right)^2 \left(\frac{L}{R}\right)}} \approx 2.74 \sqrt{\frac{R}{L} \sqrt{\frac{R}{t}}} \quad (4)$$

$$\bar{m} = \frac{m\pi R}{L} \quad D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad C = \frac{Et}{(1-\nu^2)} \quad \text{که در آن}$$

کمانش در پوسته به‌عنوان پاسخ سازه به نیروهای غشایی رخ می‌دهد. نیروهای غشایی در طول محور عضو و مماس بر سطح میانی صفحه پوسته عمل می‌کنند کمانش در این نوع سازه‌ها زمانی رخ می‌دهد که سازه بدون تغییرات در بار خارجی اعمال شده انرژی کرنشی غشایی را به انرژی کرنشی خمشی تبدیل می‌کند. در شکل (۱) نمودار بار - تغییر مکان محوری پوسته استوانه‌ای در حالت‌های نقطه حدی و دوشاخگی نشان داده شده است (Fatemi, ۲۰۱۳).



شکل ۱- منحنی بار محوری - تغییر مکان پوسته استوانه‌ای در حالت‌های نقطه حدی و دوشاخگی

### ۲- ناکاملی‌های هندسی و تأثیر آن بر کمانش پوسته‌ها

عموماً ناکاملی‌ها به چهار گروه: ۱- ناکاملی‌های هندسی، ۲- ناکاملی‌های بارگذاری، ۳- ناکاملی‌های ناشی از شرایط مرزی، ۴- ناکاملی‌های مربوط به مشخصات فیزیکی مصالح تقسیم‌بندی می‌شوند. در این تقسیم‌بندی ناکاملی‌های هندسی نسبت به سایر ناکاملی‌ها تأثیر قابل توجهی بر ظرفیت باربری پوسته‌ها دارند زیرا در حالت واقعی پوسته‌های اجرا شده هرگز از لحاظ هندسی کامل نیستند.

ناکاملی‌های هندسی شامل تمامی انحرافات در شکل عضو سازه‌ای نسبت به ترکیب هندسی ایده‌آل سازه می‌باشد. در مورد پوسته‌ها، ناکاملی‌های هندسی با انحراف از هندسه سطح میانی از شکل ایده‌آل مشخص می‌شود. در ساخت پوسته‌ها به علت بزرگی ابعاد، از پانل‌ها یا صفحات انحنادار استفاده می‌شود. درز بین صفحات مختلف منبع اصلی انحراف از فرم واقعی می‌باشد این انحرافات یا ناکاملی‌ها می‌توانند در نتیجه جوشکاری یا عدم تطبیق مناسب صفحات که ابعادشان از دیگر صفحات بزرگ‌تر است به وجود آید. ممکن است در برخی حالات ناکاملی‌های هندسی موجب تقویت سازه و افزایش ظرفیت آن نیز باشد (Vinson, ۱۹۹۸).

مقاومت کمانشی پوسته‌های بدون ناکاملی، به طور قابل ملاحظه‌ای متفاوت از مقاومت کمانشی پوسته‌های دارای ناکاملی می‌باشد. این ویژگی پوسته‌ها را در شمار سازه‌هایی قرار می‌دهد که اصطلاحاً حساس به ناکاملی هستند. در شکل (۲) رفتار کمانشی میله‌ها، صفحات و پوسته‌ها به صورت شماتیک نمایش

شدند که در خصوص ساینز ناکاملی‌ها بعضی از توصیه‌های آئین-نامه‌های درست و برخی دیگر نادرست می‌باشند. Schneider و Brede (۲۰۰۵) با استفاده از روش المان محدود غیرخطی تأثیر ناکاملی‌های هندسی را بر روی مقاومت کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای تحت فشار خارجی بررسی کردند. در این تحقیق از مود اول به عنوان ناکاملی هندسی اولیه استفاده شده است.

Golzan و Showkati (۲۰۰۸) رفتار کمانشی پوسته مخروطی جدار نازک را تحت فشار خارجی با روش‌های آزمایشگاهی مطالعه کرده و با نتایج المان محدود و فرمول تقریبی مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که ناکاملی‌های هندسی ناشی از ساخت، تأثیر کاهشی بر کمانش پوسته‌های مخروطی دارد.

Aghajari و همکاران (۲۰۱۱) اثر تغییر ضخامت در رفتار کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای را تحت اثر فشار یکنواخت بیرونی به صورت آزمایشگاهی و المان محدود بررسی کردند. آنها ۴ پوسته استوانه‌ای فولادی دارای تغییرات در ضخامت را تا مرحله فروریختگی به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و دریافتند که نتایج تحلیل المان محدود غیرخطی با آزمایشگاه مطابقت داشته و مشاهده کردند که تغییرات ضخامت تأثیر مستقیم بر محل امواج کمانشی دارد و توصیه کردند که در پوسته‌ها از تغییرات ضخامت کمتری استفاده شود.

Paor و همکاران (۲۰۱۲) کمانش ناشی از مکش در مخازن استوانه‌ای فولادی را بررسی کرده و مقدار آن را پیش‌بینی کردند. آنها تأثیر ناکاملی‌های هندسی را بر ظرفیت کمانشی مخازن استوانه‌ای فولادی جدار نازک را تحت اثر فشار خارجی یکنواخت را بررسی کرده و مشاهدات میدانی خود را در خصوص ناکاملی در مقیاس کوچک‌تر مدل کرده و آزمایشاتی انجام دادند همچنین مطالعات المان محدود انجام داده و نتایج را باهم مقایسه کردند و بر اساس یافته‌های المان محدود خرابی را پیش‌بینی کردند.

Ghazijahani و همکاران (۲۰۱۴) آزمایشاتی در مورد پوسته‌های استوانه‌ای فرورفته تحت فشار خارجی یکنواخت انجام دادند. نمونه‌های آنها دارای فرورفتگی به فرم افقی، قائم و مورب بودند و نتیجه گرفتند که شکل کمانش بستگی به راستا و عمق ناکاملی دارد به طوری که برای کوچک‌ترین فرورفتگی افقی یک خط تسلیم افقی ظاهر می‌شود اما برای فرورفتگی افقی متوسط و بزرگ ناحیه فرورفته بین دو خط تسلیم راستایی قرار می‌گیرد و برای فرورفتگی‌های قائم و مورب، ناحیه فرورفته همیشه در داخل دو خط تسلیم واقع می‌شود.

Maraveas و همکاران (۲۰۱۵) کمانش مخازن فولادی جدار نازک را تحت اثر باد بر اساس آئین‌نامه‌های طراحی اروپا و آمریکا به صورت عددی ارزیابی کردند. آنها دو مخزن استوانه‌ای فولادی را با مشخصات ارتفاع ۲۰ متر، ارتفاع سقف ۳/۹ متر و قطرهای ۴۶

در روابط بالا  $t$  ضخامت استوانه،  $R$  شعاع استوانه،  $L$  ارتفاع استوانه،  $E$  ضریب ارتجاعی،  $\nu$  ضریب پواسون،  $m$  تعداد امواج طولی و  $n$  تعداد امواج محیطی می‌باشد. در این تحقیق بار کمانشی ناشی از فشار خارجی یکنواخت توأم با نیروی محوری برای نمونه‌های آزمایشگاهی که شرایط و ابعاد آنها در بخش بعدی توصیف شده است، بر اساس رابطه تقریبی PCR (رابطه (۳))، ۲۳/۵ کیلو پاسکال و تعداد موج‌های محیطی تشکیل شده در بدنه مخزن بر اساس رابطه (۴)، ۱۳ موج به دست می‌آید. این مقدار بار کمانشی به دست آمده، برای ارزیابی و مقایسه نتایج حاصل از آنالیز المان محدود و نمونه‌های آزمایشگاهی به کار گرفته خواهد شد.

#### ۴- مطالعات پیشین در خصوص کمانش مخازن

محققین طی سالیان متمادی رفتار سازه‌های پوسته‌ای جدار نازک را به صورت تئوری، میدانی، آزمایشگاهی و المان محدود مطالعه کرده‌اند که در ادامه به تعدادی از آنها اشاره می‌شود.

طی آزمایشاتی که Dowling و همکارانش (۱۹۸۲) بر روی پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده تحت اثر بار ترکیبی جانبی و محوری انجام دادند، دریافتند که ناکاملی هندسی اولیه تأثیر چندانی در خرابی این نوع پوسته‌ها ندارد.

Chen و Shen (۱۹۹۱) در راستای موضوع کمانش ارتجاعی و حساسیت به ناکاملی‌ها در پوسته‌های استوانه‌ای، رفتار کمانشی و پس کمانشی پوسته‌های کامل و دارای ناکاملی با طول محدود را که در معرض بارگذاری مرکب خارجی و بار محوری قرار گرفته اند بررسی کرده و نتیجه گرفتند که رفتار کمانشی و پس کمانشی پوسته‌های جدار نازک تحت این بارگذاری به سه عامل شکل هندسی، بار متناسب و ناکاملی‌های هندسی اولیه بستگی دارد.

Ding (۱۹۹۶) مطالعاتی در خصوص سیلوها انجام داد و نشان داد که ناکاملی‌های هندسی با تقارن محوری نسبت به دیگر ناکاملی‌ها بیشترین اثر را بر ظرفیت باربری این سازه‌ها تحت اثر بار محوری دارد.

Pircher و همکاران (۲۰۰۱) اثر ناکاملی‌های حلقوی ناشی از جوش بر کمانش سیلوه‌ها و مخازن را بررسی کردند. آنها یک تحلیل دوشاخگی و اجزاء محدود فراکمانشی بر روی پوسته‌های ناکامل استوانه‌ای انجام داده و رفتار باربری سازه را بعد از دو شاخگی اولیه تشریح کردند.

Hornung (۲۰۰۲) و سال مطالعاتی در اندازه‌های واقعی مخازن برای بررسی تأثیر ناکاملی بر روی بار کمانشی مخازن استوانه‌ای انجام دادند. آنها ناکاملی‌های مخازنی از قطر ۱۰ تا ۷۰ متر را اندازه‌گیری کرده و سپس با مدل‌سازی عددی رفتار کمانشی آنها را تحت اثر فشار خارجی یکنواخت بررسی کردند و متوجه

در این شکل محور افقی نشان دهنده نوع ناکاملی و محور قائم نشان دهنده درصد فراوانی ناکاملی مربوطه می‌باشد. با توجه به این شکل ملاحظه می‌گردد که از میان انواع ناکاملی‌ها، ناکاملی نوع ۲ و ناکاملی نوع ۶ بیشتر از سایر ناکاملی‌ها روی داده است. ناکاملی نوع ۲ شامل فرورفتگی یا برآمدگی خط جوش قائم در لایه‌های مختلف بدنه مخازن است که در مقاله دیگری مستقلاً مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در این تحقیق اثر ناکاملی نوع ۶ که شامل انحراف بدنه مخزن نسبت به راستای قائم می‌باشد تحت عنوان ناکاملی بدنه اریب بر رفتار کمانشی مخازن مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این ناکاملی در شکل (۴) نشان داده شده است.

#### ۶- برنامه آزمایشگاهی

با توجه به نمودار شکل (۳) ملاحظه می‌گردد که ناکاملی نوع ۶ تحت عنوان ناکاملی بدنه اریب در نتیجه انحراف بدنه مخازن از راستای قائم بیشتر از سایر ناکاملی‌ها روی داده اما در رتبه دوم می‌باشد. به این منظور جهت بررسی تأثیر این ناکاملی بر رفتار کمانشی مخازن، ۳ نمونه آزمایشگاهی با مقیاس ۱/۲۰ نمونه واقعی با مشخصات زیر ساخته شد:



شکل ۴- ناکاملی مربوط به انحراف بدنه مخزن از راستای قائم (ناکاملی بدنه اریب)

نمونه اول، دارای ورق محیطی پیوسته و به صورت یکپارچه بدون ناکاملی. نمونه دوم، به صورت یکپارچه دارای یک ناکاملی از نوع بدنه اریب به اندازه ۱۵ میلی‌متر در ارتفاع مخزن. در این نمونه انحراف بدنه مخزن نسبت به راستای قائم زاویه تقریبی ۱/۵ درجه دارد. نمونه سوم، به صورت یکپارچه دارای یک ناکاملی از نوع بدنه اریب به اندازه ۳۰ میلی‌متر در ارتفاع مخزن. در این نمونه انحراف بدنه مخزن نسبت به راستای قائم زاویه تقریبی ۳ درجه دارد. تصاویر نمونه‌های آزمایشگاهی و اندازه‌گیری مقدار ناکاملی در آن‌ها در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است.

۸۸ متر که اولی سقف مخروطی و دومی سقف باز بود، مطالعه کردند و ناکاملی‌های آن‌ها را مدل‌سازی کرده و کمانش آنها را بررسی کردند و دریافتند که ناکاملی مطرح شده در آئین‌نامه اروپا به‌طور قابل ملاحظه‌ای مقاومت کمانشی مخازن استوانه‌ای را کاهش می‌دهد و باعث رشد سریع تغییر شکل‌های بدنه در مخازن با قطر بزرگ می‌شود و استاندارد تغییر شکل‌های حداکثر، نتایج رضایت بخشی نمی‌دهد.

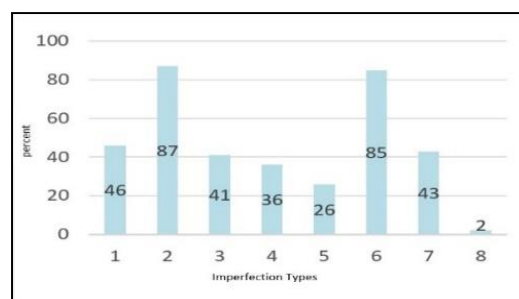
Gao و همکاران (۲۰۱۵) در مورد کمانش پوسته‌های استوانه‌ای دارای ناکاملی‌های اختیاری در ضخامت تحت بارگذاری فشاری مطالعات تئوری انجام دادند.

Evkin و همکاران (۲۰۱۶) کمانش پوسته کروی تحت اثر بارگذاری فشار خارجی و نیروی متمرکز به سمت داخل را بررسی کردند.

Hutchinson و Thompson (۲۰۱۷) تأثیر فرورفتگی متقارن بر رفتار کمانشی غیرخطی و خرابی پوسته‌های کروی را بررسی کردند.

#### ۵- تحقیقات میدانی

جهت ذخیره‌سازی محصولات نفتی در یک سایت پالایشگاهی، مخازن متعددی در حال احداث می‌باشند. برای ساخت این مخازن از ورق‌های فولادی با ابعاد  $۱/۵ \times ۶$  متر و ضخامت ۱۸ میلی‌متر استفاده می‌گردد. ورق‌های مذکور وارد دستگاه رولینگ شده و طی چندین مرحله، عملیات ایجاد انحنا انجام می‌گردد تا به شعاع مخزن برسند سپس توسط ماشین مخصوص حمل ورق‌های رول شده، به محل مربوطه منتقل شده و با استفاده از جرثقیل و نیروی انسانی عملیات نصب آنها انجام می‌گیرد. از این مرحله است که ناکاملی‌های متعددی ناشی از عوامل مختلف اجرایی به وجود می‌آیند. با بررسی میدانی این مخازن و برداشت آماری ناکاملی‌های مختلف در تمامی مخازن این سایت، نمودار توزیع فراوانی ناکاملی‌ها رسم گردید که در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳- نمودار آماری انواع ناکاملی بر حسب تعداد در کلیه مخازن



(الف)



(ب)



(ج)



شکل ۵- نمونه‌های آزمایشگاهی: الف) نمونه ۱ بدون ناکاملی بدنه اریب، ب) نمونه ۲ دارای انحراف ۱/۵ درجه، ج) نمونه ۳ دارای انحراف ۳ درجه

شکل ۶- اندازه‌گیری مقدار ناکاملی در نمونه‌های آزمایشگاهی

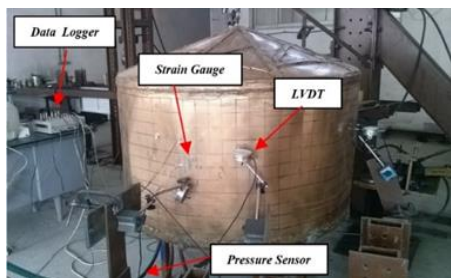
#### ۷- آزمون نمونه‌ها و ارزیابی نتایج

##### ۷-۱- بارگذاری فشار خارجی یکنواخت

جهت بارگذاری فشار خارجی یکنواخت، از دستگاه مکش استفاده می‌گردد. این دستگاه الکترو پمپی می‌باشد که هوای داخل مخزن را با دبی ثابت به بیرون تخلیه می‌کند. با تخلیه هوای داخل مخزن، فشار اتمسفر به‌طور یکنواخت بر سطوح خارجی این مخزن وارد شده و بارگذاری به‌صورت فشار خارجی یکنواخت بر مخزن اعمال می‌شود. از آنجائی که دبی تخلیه هوای مخزن خیلی بالاست لازم است شیر کنترلی جهت تنظیم دبی تخلیه و به عبارت بهتر کنترل بارگذاری تعبیه شود. جهت اندازه‌گیری فشار داخلی مخزن از دستگاه فشارسنج استفاده می‌شود. این دستگاه فشار لحظه‌ای داخل مخزن را که در اثر تخلیه توسط دستگاه مکش رو به کاهش

هر سه نمونه دارای قطر ۱/۱۵ متر، ارتفاع ۰/۶ متر، سقف مخروطی به ارتفاع ۰/۲ متر، ضخامت ورق بدنه مخزن ۱ میلی‌متر و ضخامت کف و سقف ۲ میلی‌متر می‌باشند. به‌منظور جلوگیری از کمانش سقف این نمونه‌ها تحت اثر فشار خارجی، از سخت‌کننده‌های حلقوی شکل به قطرهای ۰/۳ و ۰/۶ و ۰/۹ متر از تسمه ۵ × ۲۰ میلی‌متر و همچنین سخت‌کننده‌های طولی با همین تسمه استفاده شده است.

همچنین برای ممانعت از کمانش کف این نمونه از سخت‌کننده‌هایی به‌صورت طولی و عرضی و از نبشی بال مساوی ۲۵ میلی‌متر استفاده شده است. وجود این تسمه‌ها موجب بالا رفتن سختی خمشی در سقف و کف مخازن شده، بنابراین در اثر فشار خارجی یکنواخت این دو قسمت وضعیت اولیه خود را حفظ کرده و کمانش نمی‌کنند در نتیجه فقط بدنه مخازن شروع به حرکت نموده و کمانش خواهند کرد.



شکل ۸- دستگاه‌های اندازه‌گیری نصب شده در قسمت‌های مختلف نمونه‌ها

### ۷-۳- انجام آزمایش

با شروع به کار دستگاه پمپ مکش، تخلیه هوای داخل مخزن ۱ آغاز شده و به تدریج اختلاف فشار داخل و خارج مخزن افزایش می‌یابد در نتیجه، به تدریج فشار خارجی یکنواخت بر مخزن اعمال شده و کمانش اولیه بدنه مخزن آغاز می‌گردد. با افزایش فشار خارجی تعداد موج‌های تشکیل شده در محیط بدنه مخزن نیز افزایش یافته و مخزن به سمت کمانش کامل پیش می‌رود. پس از تشکیل ۱۲ موج در محیط مخزن، کمانش بدنه کامل شده و سرانجام در فشار خارجی ۲۱/۵ کیلوپاسکال، فروریختگی مخزن به صورت ناگهانی اتفاق افتاده و مخزن ناپایدار می‌گردد. در شکل (۹) کمانش کامل و در شکل (۱۰) ناپایداری و فروریختگی مخزن آزمایشگاهی شماره ۱ نشان داده شده است.



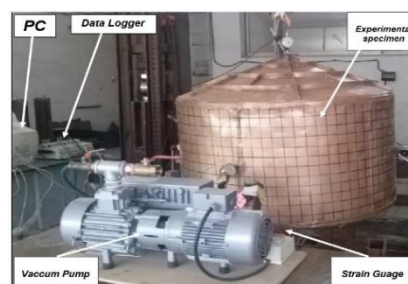
شکل ۹- کمانش کامل نمونه ۱ و آستانه خرابی



شکل ۱۰- فروریختگی نمونه ۱

است نشان می‌دهد. فشار خارجی از تفاضل فشار اتمسفر و فشار داخل مخزن به دست می‌آید.

در کف مخزن سه سوراخ تعبیه شده است، سوراخ اول به دستگاه مکش وصل بوده و توسط آن عمل تخلیه انجام می‌شود (اعمال فشار خارجی یکنواخت). سوراخ دوم به شیر تخلیه وصل بوده و وظیفه کنترل دبی تخلیه مخزن را بر عهده دارد (کنترل بارگذاری) و سوراخ سوم جهت اندازه‌گیری فشار داخلی به فشارسنج وصل می‌شود (اندازه‌گیری بارگذاری). در شکل (۷) تجهیزات آزمایشگاهی شامل پمپ مکش جهت اعمال بارگذاری، شیر کنترل بارگذاری، دستگاه اندازه‌گیری بارگذاری، دستگاه‌های اندازه‌گیری تغییر شکل، محل قرارگیری نمونه آزمایش، دیتا لاگر و کامپیوتر نشان داده است.



شکل ۷- تجهیزات آزمایشگاهی و نمونه مخازن

### ۷-۲- دستگاه‌های اندازه‌گیری تغییر شکل

به منظور برداشت تغییر شکل نمونه‌های آزمایشگاهی، دستگاه‌های اندازه‌گیری تغییر شکل در قسمت‌های مختلف این نمونه‌ها در وسط ارتفاع به صورت شعاعی و همچنین در راس سقف مخروطی نمونه‌ها نصب شده است. این دستگاه‌ها شامل LVDT و کرنش‌سنج می‌باشند. LVDTها تغییر مکان‌های راستایی را به صورت قائم، افقی و یا شعاعی در محلی که نصب می‌شوند برداشت کرده و به دیتالاگر ارسال می‌کنند. کرنش‌سنج‌ها مدارات الکترونیکی هستند که با چسب مخصوص در محل مورد نظر چسبانده شده و بر حسب راستایی که نصب شده‌اند کرنش‌های آن راستا را اندازه‌گیری کرده و به کامپیوتر ارسال می‌کنند. در این تحقیق به تعداد پنج LVDT و دو کرنش‌سنج افقی و قائم جهت ثبت تغییر شکل قسمت‌های مختلف نمونه‌های آزمایشگاهی استفاده شده است. در شکل (۸) نمونه‌ای از این دستگاه‌های اندازه‌گیری که بر روی نمونه آزمایشگاهی نصب شده‌اند نشان داده شده است.



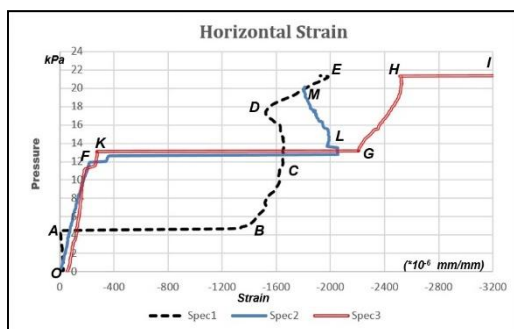


شکل ۱۴- فروریختگی مخزن ۳ در محل LVDT3

همان طوری که در این شکل‌ها ملاحظه می‌شود کماتش کامل و فرم ناپایداری هر سه نمونه مشابه بوده و تا کماتش کامل، امواج محیطی مرتبی در بدنه مخازن دیده می‌شود اما محل ناپایداری نمونه‌های ۲ و ۳ با نمونه ۱ متفاوت بوده و خرابی این نمونه‌ها در فاصله ۹۰ درجه از محل ناکاملی روی می‌دهد.

#### ۷-۴- ارزیابی نتایج آزمایشگاهی

با برداشت داده‌های به دست آمده از دستگاه‌های اندازه‌گیری نصب شده در نقاط مختلف این مخازن، نمودار کرنش و تغییر مکان شعاعی این نقاط نسبت به فشار خارجی اعمال شده رسم می‌شود. در شکل (۱۵) نمودار کرنش افقی در نصف ارتفاع بدنه برای هر سه مخزن در محل LVDT3 که تقریباً در مجاورت محل ناپایداری این مخازن واقع گردیده، بر حسب فشار خارجی رسم شده است. کرنش‌های افقی تغییر شکل‌های محیطی (مداری) و کرنش‌های قائم تغییر شکل‌های نصف‌النهاری مخزن را نشان می‌دهند.



شکل ۱۵- نمودار کرنش افقی بدنه مخازن آزمایشگاهی در محل ناپایداری

نمونه ۱ از شروع بارگذاری تا فشار خارجی ۵ کیلوپاسکال (نقطه A) تغییرات کرنشی خیلی کمی نشان می‌دهد. بدنه مخزن ۱ در این نقطه کماتش موضعی نموده و پرسی بر روی نمودار از نقطه A تا B دیده می‌شود. نوسانات نمودار از نقطه B تا C بیانگر ایجاد موج‌های کماتشی متعدد در محیط بدنه نمونه و در اطراف

در آزمایش نمونه شماره ۲، بارگذاری همانند نمونه شماره ۱ به تدریج و به صورت کنترل شده تا مرحله فروریختگی و ناپایداری کامل نمونه آزمایشگاهی ادامه می‌یابد. پس از تشکیل ۱۰ موج در محیط مخزن، کماتش بدنه کامل شده و سرانجام در فشار خارجی ۲۰/۱ کیلوپاسکال، فروریختگی این مخزن به صورت ناگهانی اتفاق افتاده و مخزن ناپایدار می‌گردد. در شکل (۱۱) کماتش کامل و در شکل (۱۲) ناپایداری و فروریختگی مخزن آزمایشگاهی شماره ۲ نشان داده شده است. آزمایش نمونه شماره ۳ همانند دو نمونه قبلی به صورت کنترل شده تا مرحله فروریختگی و ناپایداری کامل نمونه آزمایشگاهی ادامه می‌یابد. در این نمونه تعداد ۱۰ موج محیطی در نقاط مختلف بدنه مخزن تشکیل شده و مخزن به حالت کماتش کامل می‌رسد سپس با ادامه بارگذاری نمونه به سمت خرابی و ناپایداری رفته و سرانجام در فشار خارجی ۲۲ کیلوپاسکال به طور ناگهانی ناپایدار می‌شود. در شکل (۱۳) کماتش کامل مخزن آزمایشگاهی شماره ۳ و در شکل (۱۴) ناپایداری و فروریختگی این مخزن نشان داده شده است.



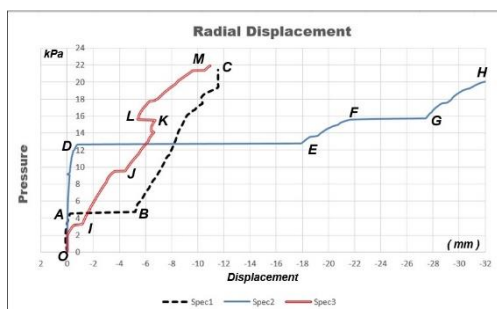
شکل ۱۱- کماتش کامل نمونه ۲ و آستانه خرابی



شکل ۱۲- فروریختگی نمونه ۲



شکل ۱۳- کماتش کامل نمونه ۳ و آستانه خرابی



شکل ۱۶- تغییر مکان شعاعی بدنه مخازن آزمایشگاهی در محل ناپایداری

مخزن ۱ از شروع بارگذاری تا فشار ۵ کیلوپاسکال (نقطه A) تغییر مکان شعاعی قابل توجهی نشان نمی‌دهد این موضوع نشان دهنده مقاومت غشایی اولیه خوب برای این نمونه می‌باشد. از نقطه A تا B پرشی در نمودار دیده می‌شود که مربوط به کمناش موضعی محل LVDT3 است. از نقطه B تا C با افزایش فشار خارجی تغییر مکان شعاعی نیز افزایش یافته و در نقطه C به مقدار ۱۲ میلی‌متر می‌رسد. در این هنگام مخزن به طور ناگهانی ناپایدار شده و خرابی روی می‌دهد.

در مخزن ۲ با شروع فشار خارجی، تغییر مکان شعاعی نیز به طور ملایم آغاز می‌گردد و تا نقطه D ادامه می‌یابد. در ناحیه D تا E به دلیل کمناش موضعی محل LVDT3 در فشار خارجی ۱۳ کیلوپاسکال پرشی در نمودار دیده می‌شود. از نقطه E به بعد با هم تغییر شکل‌ها افزایش می‌یابند تا این که در نقطه F که تغییر شکل شعاعی به مقدار ۲۲ میلی‌متر رسیده است به علت کمناش موضعی نقطه مجاور، پرش ناحیه FG به وجود می‌آید. از نقطه G با افزایش فشار خارجی تغییر شکل‌ها نیز افزایش می‌یابند سرانجام، در فشار ۲۰/۱ کیلوپاسکال و تغییر شکل ۳۲ میلی‌متر نمونه به آخرین حد مقاومت غشایی خود رسیده و خرابی روی می‌دهد (نقطه H).

در مخزن ۳ نیز همانند مخزن ۲ با شروع بارگذاری تغییر مکان‌های شعاعی شروع شده و با افزایش فشار خارجی تغییر شکل‌ها با آهنگ ملایمی افزایش می‌یابند و تا نقطه I ادامه دارند. از این نقطه کمناش موضعی بدنه مخزن شروع می‌گردد به طوری که در فشار ۳ کیلوپاسکال در نقطه I، در فشار ۱۰ کیلو پاسکال در نقطه J و در فشار ۱۶ کیلوپاسکال در نقطه K کمناش موضعی دیده می‌شود. از نقطه L با افزایش فشار خارجی تغییر شکل‌ها دوباره افزایش می‌یابند تا این که در نقطه M به مقدار ۱۱ میلی‌متر می‌رسند در این مرحله مخزن ناپایدار شده و در فشار ۲۲ کیلوپاسکال خرابی روی می‌دهد.

ملاحظه می‌گردد که تغییر شکل‌های مخزن ۱ نسبت به مخازن دیگر کمتر بوده و تغییر شکل‌های مخزن ۲ از همه بیشتر است. این موضوع نشان دهنده مقاومت غشایی خوب مخازن سالم

می‌باشد. نمودار نشان می‌دهد که کرنش‌های تولید شده در این ناحیه به سمت بیرون هستند. از نقطه C تا D علی‌رغم افزایش فشار خارجی جهت کرنش‌های بدنه نمونه تغییر کرده و به سمت داخل تولید می‌شوند اما در نقطه D دوباره کرنش‌ها تغییر جهت داده و در جهت مخالف و به سمت بیرون مخزن تولید می‌شوند. از نقطه D با افزایش فشار خارجی کرنش‌ها نیز افزایش یافته و سرانجام در نقطه E نمونه ناپایدار شده و در فشار ۲۱/۵ کیلوپاسکال خرابی روی می‌دهد.

در نمونه ۲ برخلاف نمونه ۱ به محض شروع بارگذاری کرنش‌های زیادی تولید می‌شود این کرنش‌ها با آهنگ ملایمی تا نقطه F ادامه دارند سپس به علت کمناش نقطه مورد مطالعه، منحنی کرنش تا نقطه L تغییر ناگهانی داشته و پرش می‌کند. از نقطه L تا M علی‌رغم افزایش فشار خارجی جهت کرنش تغییر یافته و در جهت عکس تولید می‌شود تا این که در نقطه M نمونه به مرحله خرابی رسیده و ناپایدار می‌گردد. فشار منجر به خرابی این نمونه ۲۰/۱ کیلوپاسکال می‌باشد.

تغییرات کرنش نمونه ۳ مشابه نمونه ۲ می‌باشد. کرنش این نمونه نیز با شروع بارگذاری تا نقطه K رو به افزایش است. در این نقطه به دلیل وقوع کمناش موضعی بدنه، پرش در منحنی دیده می‌شود (ناحیه KG). در نقطه G با افزایش فشار خارجی باز هم کرنش افزایش می‌یابد این روند تا نقطه H ادامه دارد. به علت کمناش موضعی اطراف LVDT3 پرشی دوباره در نمودار کرنش تولید می‌گردد تا این که در نقطه I نمونه به مرحله خرابی رسیده و ناپایدار می‌گردد. فشار خارجی منجر به فروریختگی و خرابی این نمونه ۲۲ کیلوپاسکال می‌باشد.

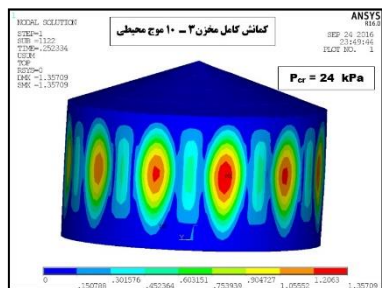
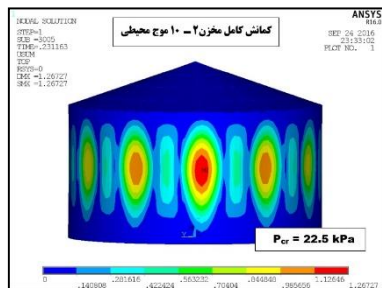
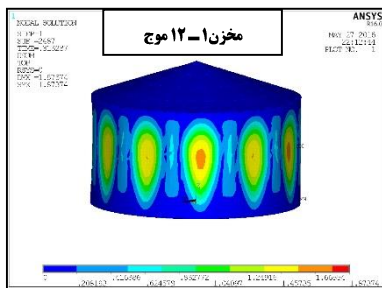
ملاحظه می‌گردد که رفتار کرنشی نمونه بدون ناکاملی در مقایسه با نمونه‌های دارای ناکاملی متفاوت است. در نمونه‌های ۲ و ۳ وقتی فشار به مقدار ۱۳ کیلو پاسکال یعنی در حدود ۶۰٪ بار منجر به خرابی می‌رسد کمناش موضعی در بدنه نمونه‌ها و در یک نقطه مشخص به فاصله ۹۰ درجه از محل ناکاملی روی می‌دهد. در این حالت مقدار کرنش حداکثر تولید شده در نمونه ۳ تقریباً برابر نمونه ۲ است در حالی که در نمونه ۱ کرنش‌های تولید شده تقریباً نصف نمونه‌های ۲ و ۳ است.

در این تحقیق تغییر مکان شعاعی بدنه مخازن نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. شکل (۱۶) تغییر مکان شعاعی بدنه مخازن را در محل LVDT3 بر حسب فشار خارجی نشان می‌دهد. این نقطه تقریباً در نزدیکی محل ناپایداری و خرابی مخازن قرار گرفته است.



بارگذاری نمونه‌ها به صورت فشار خارجی می‌باشد که به طور یکنواخت بر سقف و بدنه مخازن مشابه حالت واقعی اعمال می‌شود. آنالیز نمونه‌ها از نوع کمانش غیرخطی شامل غیرخطیت هندسی و غیرخطیت مصالح می‌باشد. پس از آنالیز نمونه‌ها می‌توان تغییر شکل‌های ایجاد شده شامل موج‌های کمانشی تشکیل شده در بدنه مخازن را طی مراحل مختلف بارگذاری مشاهده نمود. در شکل (۱۸) کمانش کامل مخازن مدل‌سازی شده قبل از ناپایداری در حالت غیرخطی نشان شده است.

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در مدل اول ۱۲ موج کامل و در مدل‌های دوم و سوم ۱۰ موج کامل در محیط بدنه مخازن تشکیل شده است. در نمونه‌های آزمایشگاهی نیز بعد از کمانش کامل و قبل از ناپایداری به ترتیب ۱۲ موج کامل برای مخزن ۱ و ۱۰ موج کامل برای مخازن ۲ و ۳ در بدنه آنها تشکیل شده بود که تطابق بسیار خوبی بین آنالیز المان محدود و آزمایشگاه دیده می‌شود.

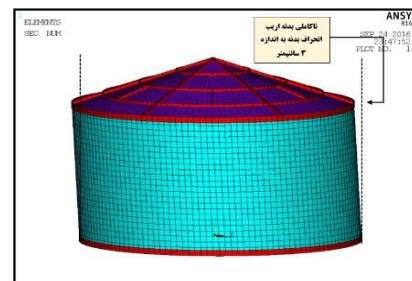
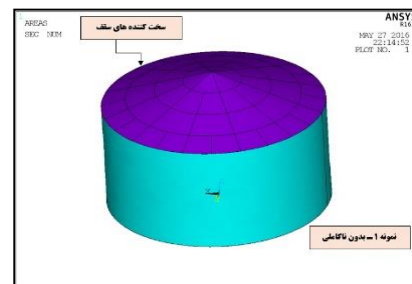


شکل ۱۸- کمانش کامل مخازن مورد مطالعه و تغییر شکل‌های غیرخطی ایجاد شده در بدنه این مخازن

نسبت به مخازن دارای ناکاملی تحت بارگذاری فشار خارجی (حالت مکش) می‌باشد. همچنین مخزن ۳ که دارای یک ناکاملی اریب به مقدار ۳ سانتی‌متر می‌باشد، مقاومت غشایی خوبی نسبت به مخزن ۲ که یک ناکاملی ۱۵ میلی‌متر می‌باشد نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد وجود این نوع ناکاملی در بدنه مخازن باعث تأخیر در خرابی نسبت به مخزن سالم می‌شود. به عبارت بهتر این موضوع بیانگر تأثیر مثبت ناکاملی بدنه اریب بر رفتار کمانشی مخازن و خرابی آنها دارد.

### ۸- آنالیز المان محدود نمونه‌ها

به منظور بررسی رفتار کمانشی نمونه‌های آزمایشگاهی ارزیابی شده، مدل‌سازی و آنالیز المان محدود این نمونه‌ها با همان مشخصات ذکر شده، توسط نرم‌افزار المان محدود ANSYS صورت گرفته است. مدل‌سازی مخزن ۱ به صورت ورق پیوسته محیطی بدون ناکاملی، مخزن ۲ به صورت ورق پیوسته دارای یک ناکاملی بدنه اریب با زاویه انحراف ۱/۵ درجه نسبت به راستای قائم و مخزن ۳ به صورت ورق پیوسته دارای یک ناکاملی بدنه اریب با زاویه انحراف ۳ درجه نسبت به راستای قائم مدل‌سازی شده‌اند. در همه نمونه‌ها ضخامت ورق بدنه ۱ میلی‌متر و ضخامت سقف و کف ۲ میلی‌متر لحاظ شده است. جهت جلوگیری از کمانش سقف و کف مدل‌ها از سخت‌کننده‌هایی کاملاً مشابه نمونه‌های آزمایشگاهی استفاده شده است. در شکل (۱۷) مدل المان محدود این مخازن نشان داده شده است.



شکل ۱۷- مدل المان محدود نمونه‌های آزمایشگاهی

نمودار (ب) منحنی فشار- تغییر شکل مدل ۲ را که دارای یک ناکاملی اریب با زاویه انحراف ۱/۵ درجه است، نشان می‌دهد. در این مدل با شروع فشار خارجی، تغییر شکل بدنه نیز در محل مورد مطالعه به صورت ملایم آغاز می‌گردد تا این که در نقطه E به مقدار ۲ میلی‌متر می‌رسد. در این مرحله تحت بارگذاری بسیار کم تغییر شکل‌های بزرگ به وجود می‌یابند این موضوع نشان دهنده کماتش اولیه مدل در نقطه F می‌باشد. با ادامه بارگذاری موج‌های متعددی در بدنه تشکیل شده (ناحیه FG) و در نقطه G کماتش بدنه تحت فشار ۲۲/۵ کیلوپاسکال کامل می‌شود.

نمودار (ج) منحنی فشار- تغییر شکل مدل ۳ را که دارای یک ناکاملی اریب با زاویه انحراف ۳ درجه است، نشان می‌دهد. آهنگ تغییرات این نمودار همانند نمودار مدل ۲ می‌باشد با این تفاوت که در نقطه I کماتش محیط بدنه در فشار ۲۴ کیلوپاسکال کامل می‌شود (افزایش ۹٪). در این حالت تغییر شکل‌های محیطی به مقدار ۱۳ میلی‌متر رسیده است که در مقایسه با مدل ۲ تفاوت چندانی نشان نمی‌دهد.

#### ۹- جمع‌بندی

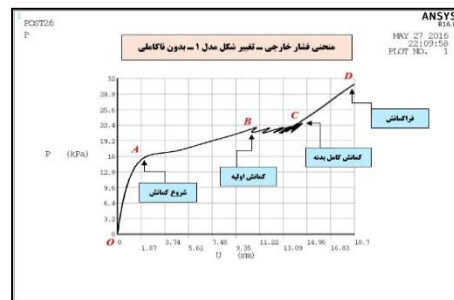
با جمع‌بندی نتایج به دست آمده برای نمونه‌های آزمایشگاهی، المان محدود و رابطه تقریبی نمودارهای شکل (۲۰) رسم می‌شوند. نمودار (الف) نتایج حاصله برای نمونه اول را که بدون ناکاملی است نشان می‌دهد. بر اساس رابطه تقریبی (۵) بار کماتشی نمونه ۲۳/۵ کیلو پاسکال به دست می‌آید. در حالی که بر اساس نتایج آزمایشگاهی بار کماتش کامل این نمونه ۲۱/۵ و براساس آنالیز المان محدود ۲۲ کیلو پاسکال می‌باشد. بنابراین آزمایشگاه ۸ درصد کمتر از تئوری و المان محدود ۶/۵ درصد کمتر از تئوری و ۲ درصد بیشتر از آزمایشگاه نشان می‌دهد.

نمودار (ب) نتایج حاصله برای نمونه دوم را که دارای یک ناکاملی اریب با زاویه انحراف ۱/۵ درجه است، نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار بار کماتشی نمونه آزمایشگاهی ۲۰/۱ کیلو پاسکال و بار کماتشی حاصل از المان محدود ۲۲/۵ کیلو پاسکال می‌باشد بنابراین آزمایشگاه ۱۵ درصد کمتر از تئوری و المان محدود ۴ درصد کمتر از تئوری و المان محدود ۱۲ درصد بیشتر از آزمایشگاه نشان می‌دهد.

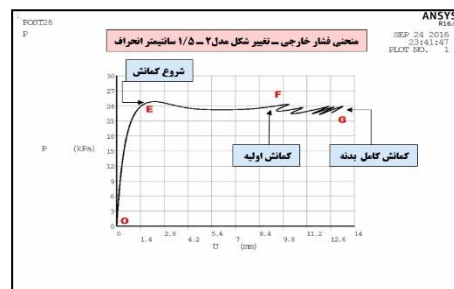
نمودار (ج) نتایج حاصله برای نمونه سوم را که دارای یک ناکاملی اریب با زاویه انحراف ۳ درجه است، نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار بار کماتشی نمونه آزمایشگاهی ۲۲ کیلو پاسکال و بار کماتشی حاصل از المان محدود ۲۴ کیلو پاسکال می‌باشد. بنابراین آزمایشگاه ۷ درصد کمتر از تئوری و المان محدود ۲ درصد بیشتر از تئوری و ۹ درصد بیشتر از آزمایشگاه نشان می‌دهد.

با رسم دیاگرام فشار خارجی- تغییر شکل، در نقاط مختلف مدل‌ها از جمله در محل LVDT3 که محل فروریختگی و ناپایداری نمونه‌های آزمایشگاهی است، مقدار تقریبی فشار خارجی منجر به کماتش کامل این نمونه‌ها تعیین می‌گردد. شکل (۱۹) نمودار فشار خارجی- تغییر شکل مدل‌های المان محدود مخازن را نشان می‌دهد.

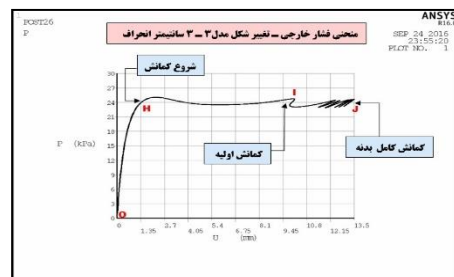
نمودار (الف) منحنی فشار- تغییر شکل مدل ۱ را که بدون ناکاملی است نشان می‌دهد. در این نمودار نقطه A شروع تغییر شکل در بدنه است که در فشار ۱۶ کیلوپاسکال آغاز می‌گردد. با افزایش فشار تغییر شکل‌های بزرگ‌تری در بدنه مدل تولید شده و در نقطه B به مقدار ۱۰ میلی‌متر می‌رسند. نقطه B کماتش اولیه این مدل محسوب می‌شود. از نقطه B تا C موج‌های کماتشی دیگری در بدنه تشکیل می‌شود و پس از تکمیل در نقطه C تحت فشار ۳۰ کیلوپاسکال مرحله فراکاماتش آغاز شده و تا فشار ۳۰ کیلو پاسکال ادامه می‌یابد ( ناحیه CD).



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۹- نمودار فشار خارجی- تغییر مکان محل ناپایداری مخازن

مطالعه هستند، تفاوت چشمگیری دارند. با توجه به موارد اشاره شده، نمودارهای المان محدود برخلاف نمودارهای آزمایشگاهی، رفتار واقعی مخازن مورد مطالعه مانند شروع کمانش و ترتیب تشکیل موج‌های کمانشی را تحت فشار خارجی یکنواخت نشان نمی‌دهند لیکن نتایج مربوط به کمانش کامل نمونه‌ها، در مقایسه با آزمایشگاه، رابطه تقریبی و آئین نامه ASME با اختلاف کمی هم-خوانی داشته و در مقایسه‌های بعدی از نتایج المان محدود کمانش کامل نمونه‌ها، استفاده شده است.

#### ۱۰- نتیجه‌گیری

۱- بررسی میدانی اجرای مخازن فولادی نشان می‌دهد که ناکاملی از نوع جابه‌جایی بدنه نسبت به راستای قائم تحت عنوان ناکاملی بدنه اریب پس از ناکاملی خط جوش قائم، شایع‌ترین ناکاملی ایجاد شده در بدنه مخازن فولادی می‌باشد.

۲- وجود ناکاملی بدنه اریب باعث کاهش تعداد موج‌های تشکیل شده در بدنه مخازن می‌گردد، طول موج‌های تشکیل شده مساوی نبوده و در محل ناکاملی امواج کوچک‌تر و در قسمت‌های مقابل امواج بزرگ‌تری تشکیل می‌گردد.

۳- مخازن دارای ناکاملی بدنه اریب مقاومت اولیه خوبی در مقابل کمانش ناشی از فشار خارجی نشان می‌دهند به طوری که کرنش‌های تولید شده در این مخازن در ۵۰٪ بارگذاری منجر به خرابی کامل، معادل کرنش‌های تولید شده در مخزن سالم در ۲۰٪ بارگذاری منجر به خرابی می‌باشد.

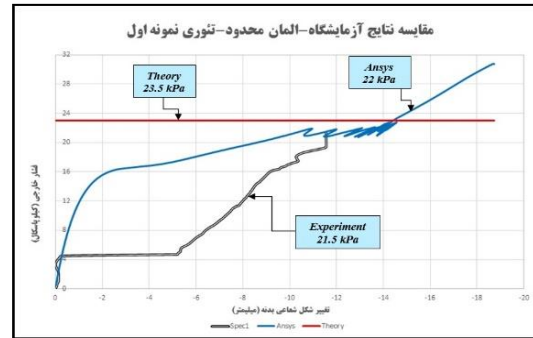
۴- محل خرابی مخازن دارای ناکاملی بدنه اریب در فواصل ۹۰ درجه از محل ناکاملی مشاهده گردید.

۵- تغییر شکل‌های ایجاد شده در نمونه ۲ تقریباً سه برابر نمونه سالم (بدون ناکاملی) روی داد اما تغییر شکل‌های ایجاد شده در نمونه ۳ تقریباً برابر نمونه سالم (بدون ناکاملی) شد.

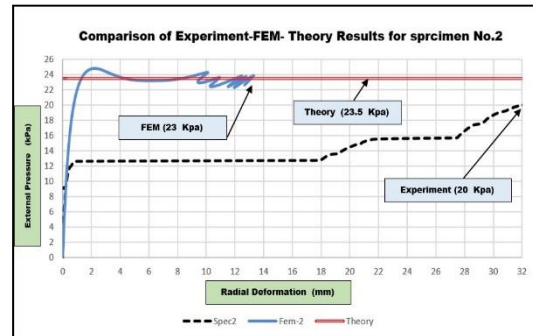
۶- بار کمانشی نمونه بدون ناکاملی به دست آمده از آزمایشگاه ۸٪ کمتر از تئوری و بار کمانشی المان محدود ۶/۵٪ کمتر از تئوری و ۲٪ بیشتر از آزمایشگاه نشان می‌دهد.

۷- بار کمانشی نمونه دارای ناکاملی بدنه اریب به مقدار ۱/۵ درجه، به دست آمده از آزمایشگاه ۱۵٪ کمتر از تئوری و بار کمانشی المان محدود ۴٪ کمتر از تئوری و ۱۲٪ بیشتر از آزمایشگاه نشان می‌دهد.

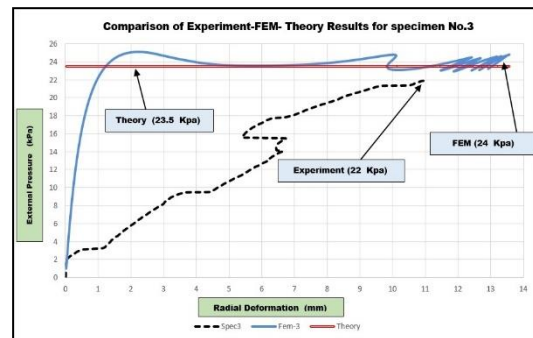
۸- بار کمانشی نمونه دارای ناکاملی بدنه اریب به مقدار ۳ درجه، به دست آمده از آزمایشگاه ۷٪ کمتر از تئوری و بار کمانشی المان محدود ۲٪ بیشتر از تئوری و ۹٪ بیشتر از آزمایشگاه نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲۰- مقایسه نتایج مختلف به دست آمده برای رفتار کمانشی مخازن

با مقایسه نمودارهای آزمایشگاهی و المان محدود ملاحظه می‌شود که این نمودارها برهم منطبق نبوده و تفاوت محسوسی دارند. نمودارهای آزمایشگاه، کمانش اولیه، مراحل تشکیل موج‌های کمانشی، کمانش کامل و فروریختگی را به خوبی نشان می‌دهند در حالی که نمودارهای المان محدود چنین نبوده و پرش‌های روی نمودار مربوط به تشکیل موج‌های کمانشی دیده نمی‌شود. علت این تفاوت آن است که نمونه‌های آزمایشگاهی دارای ناکاملی‌های موضعی متعددی هستند که برای برداشت و اندازه‌گیری آنها تجهیزات خاص اندازه‌گیری از جمله دستگاه اسکن مورد نیاز می‌باشد. با توجه به امکانات محدود آزمایشگاهی امکان برداشت دقیق این ناکاملی‌های موضعی وجود نداشته و لذا این ناکاملی‌ها در مدل‌های المان محدود نیز لحاظ نشده است لذا نمودارهای المان محدود با نمودارهای آزمایشگاه که بیانگر رفتار واقعی مخازن مورد

- thin-walled steel silos and tanks", *Journal of Thin-Walled Structures*, 2001, 39, 999-1014.
- Schneider W, Brede A, "Consistent Equivalent Geometric Imperfection for the Numerical Buckling Strength Verification of Cylindrical Shells under Uniform External Pressure", *Journal of Thin-Walled Structures*, 2005, 43, 175-188.
- Shen HSh, Chen TY, "Buckling and Post Buckling Behavior of Cylindrical Shell under Combined External Pressure and Axial Compression", *Journal of Thin-Walled Structures*, 1991, 12, 321-334.
- Showkati H, Ansourian H, "Influence of Primary Boundary Condition on the Buckling of Shallow Cylindrical Shells", *Constructional Steel Research*, 1995, 36 (1), 53-75.
- Vinson JR, "The Behavior of Thin-Walled Structures: Beams, Plates and Shells", Kluwer Academic Publisher, *Mechanics of Surface Structures*, 8, 1998.
- ۱۱- مراجع
- Abramovich H, Singer J, Weller T, "Repeated buckling and its influence on the geometrical imperfections of stiffened cylindrical shells under combined loading", *International Journal of Nonlinear Mechanics*, 2002, 37, 577-588.
- Aghajari S, Showkati H, Abedi K, "Experimental Investigation on the buckling of Thin Cylindrical Shells with Two-Stepwise Variable Thickness under External Pressure", *Journal of Structural Engineering and Mechanics*, 2011, 39 (6), 849-860.
- Brush DO, Almorth BO, "Buckling of Beams, Plates and Shells", Mc Grow Hill, New York, 1975.
- Cao G, Chen Z, Yang L, Fan H, Zhou F, "Analytical study on the buckling of cylindrical shells with arbitrary thickness imperfections under axial compression", *Journal of pressure vessel technology*, 2015, 137, 1-9.
- Ding X, MColernan R, Rotter JM, "Technique for Precise Measurement of Large-Scale Silos and Tanks", *Journal of Surveying Engineering*, 1996, 122 (1), 15-25.
- Dowling P, Hardnig JE, Agelidis N, Fahy W, "Buckling of orthogonally stiffened cylindrical shell used in offshore engineering", *Proceeding Colloquium*, University of Stuttgart, Germany, 1982, 239-274.
- Evkin A, Kolesnikov M, Prikazchikov DA, "Buckling of a spherical shell under external pressure and inward concentrated load", *Journal of Mathematics and Mechanics. Solids*, 2016, 1, 1-13.
- Farshad M, "Stability of Structures", 2nd ed, Mc Grow Hill, New York, 1983.
- Fatemi SM, Showkati H, Maali M, "Experiments on Imperfect Cylindrical Shells under Uniform External Pressure", *Journal of Thin-Walled Structures*, 2013, 65, 14-25.
- Ghazijahani T.G, Jiao H, Holloway D, "Experiments on dented cylindrical shells under peripheral pressure", *Journal of Thin-Walled Structures*, 2014, 84, 14-25.
- Golzan BS, Showkati H, "Buckling of Thin-walled Conical Shells under Uniform External Pressure", *Journal of Thin-Walled Structures*, 2008, 46 (5), 516-529.
- Hornung U, Saal H, "Buckling Loads of Tank Shells with Imperfection", *International Journal of Nonlinear Mechanics*, 2002, 37, 605-621.
- Hutchinson JW, Thompson JMT, "Nonlinear buckling behavior of spherical shells: barriers and symmetry-breaking dimples", *Journal of Philos Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2017, 375, 82-93.
- Maraveas C, Balokas GA, Tsavdaridis KD, "Numerical evaluation on shell buckling of empty thin-walled steel tanks under wind load according to current American and European design codes", *Journal of Thin-Walled Structures*, 2015, 95, 152-160.
- Paor C, Kelliher D, Cronin KWM, Wright DS, Mc Sweeney G, "Prediction of vacuum-induced buckling pressures of thin-walled cylinders", *Journal of Thin-Walled Structures*, 2012, 55, 1-10.
- Pircher M, Berry PA, Ding X, Bridge RQ, "The shape of circumferential weld-induced imperfections in

## EXTENDED ABSTRACT

# Study on Buckling Behavior of Cylindrical Steel Tanks Subjected to Oblique Body Imperfection under Uniform External Pressure

Mehdi Rastgar <sup>a,\*</sup>, Hossein Showkati<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Department of Civil Engineering, Khoy Branch, Islamic Azad University, Khoy, Iran

<sup>b</sup> Faculty of Civil Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

Received: 50 February 2017; Accepted: 15 July 2018

### Keywords:

Buckling behavior, Geometric imperfection, External pressure, Cylindrical tank.

## 1. Introduction

In this research, a field study was accomplished on the implementation of the storage tanks in a refinery site, and the resulted imperfections were identified and categorized. One imperfection experimentally modeled and the buckling behavior of these tanks was evaluated under uniform external pressure. The cylindrical tanks were examined using finite element analysis, and the results were compared with the experimental results. Investigating the findings demonstrated that such imperfection has a significant role in reducing the number of environmental waves in the body and increasing buckling resistance of the tanks under uniform external pressure.

## 2. Methodology

### 2.1. Field Survey

By the field study on the implementation of the tanks and statistical inference from the imperfections introduced in all the 8 tanks being constructed in the refinery site, the frequency distribution graph of the imperfections is drawn, as shown in Fig. 1-a. It can be seen that imperfection types 2 and 6 occur more frequently than others, respectively. Imperfection type 6 is shown in Fig. 1-b. In this research the effect of imperfection type 6 named that oblique body imperfection is studied on the buckling behavior of steel tanks.

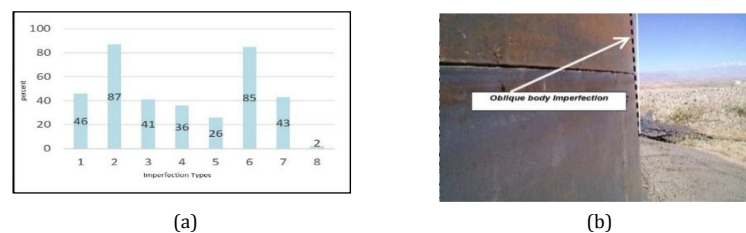


Fig. 1. (a) Frequency distribution graph of the imperfection types in all tanks, (b) oblique body imperfection

### 2.2. Experimental study

To experimental evaluation of the impact of oblique body imperfection on the buckling behavior of tanks, three experimental specimens are made: Spec1 has a continuous circumferential plate in an integrated form

\* Corresponding Author

E-mail addresses: m.rastgar@urmia.ac.ir (Mehdi Rastgar), h.showkati@urmia.ac.ir (Hossein Showkati).



without intended imperfection. Spec2 has an intentional oblique body imperfection with size of 15 mm over the tank height. Spec3 has an intentional oblique body imperfection with size of 30 mm over the tank height. These specimens are shown in Fig. 2.



Fig. 2. Experimental specimens

In order to evaluate the buckling behavior of experimental specimens influenced by uniform external pressure, suction device, LVDT, strain gauge and pressure sensor are used. External pressure is gradually applied to the tank, and the initial buckling of the tank body begins. By increasing the external pressure, the number of waves formed in the tank body is also increased, and the tank moves toward full buckling. Then the tank failure suddenly happens, and the tank becomes unstable. In Fig. 3 failure of the all experimental Specimens are shown.



Fig. 3. (a) Full buckling of Spec1 and instability threshold, (b) Failure of the Spec 1.

By taking the data obtained from the measurement devices installed at different parts of these tanks, strain and radial displacement graphs of these points are drawn relative to the applied external pressure. Fig. 4-a shows the horizontal strain diagram in terms of external pressure and Fig. a-b shows the radial displacement of the body of tanks at the location of LVDT3 in terms of external pressure. This point is almost close to the buckling and instability site of specimens.

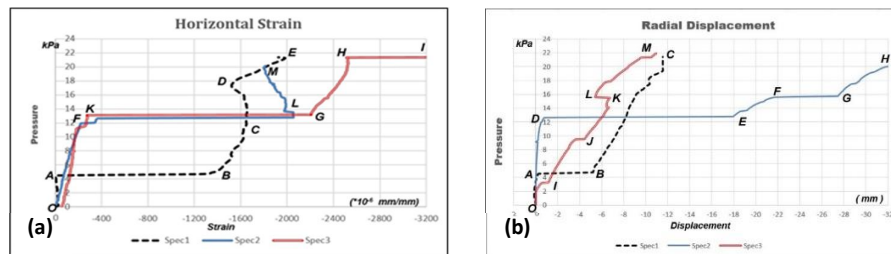


Fig. 4. (a) Horizontal strain diagram, (b) Radial displacement of three specimen tanks at the failure location

### 2.3. FE modeling

Numerical modeling of the specimens is carried out by the ANSYS software with the same characteristics. In finite element models, support conditions resemble real tanks so that there is a fixed connection between the floors and the grounds of the models, and ring beams are used in the connection of floor and roof to the body. Loading of models is an external pressure that is applied on the specimen's body and roof uniformly similar to the actual state. In Fig. 5, the full buckling of the modeled specimens is shown before instability in the nonlinear state. In the experimental specimens, after full buckling and before the instability of tanks, 12 waves in model 1 and 10 full waves in the models 2 and 3 are formed in the body of the tanks to observe a good correspondence.

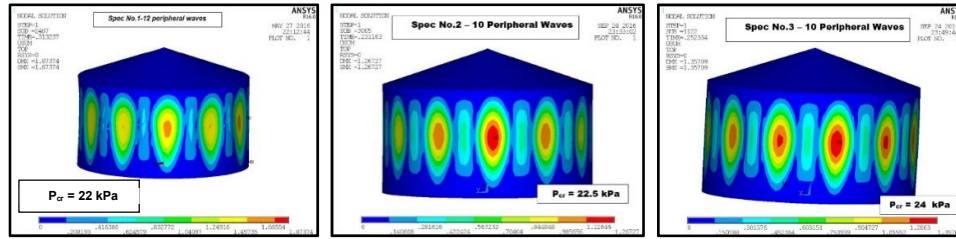


Fig. 5. Full buckling of the FEM models and created deformations in the nonlinear state

### 3. Results and discussion

By concluding the results obtained for the experimental specimens, finite element, and the approximate relationship, the diagrams of Fig. 6 are drawn.

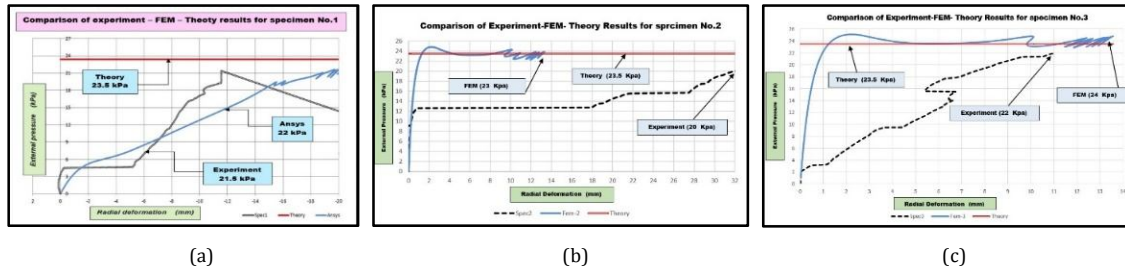


Fig. 6. Comparison of the experiments, FEM and theory results for buckling behavior of all specimens

Diagram (a) illustrates the obtained results for the first specimen, which is without intentional imperfection. (b) illustrates the obtained results for the second specimen, and (c) illustrates the obtained results for the third specimen. The strain of Spec1 comparing to Spec2 and 3 is different. In Spec2 and 3, when pressure amounts to 13 KPa i.e., about 60% of the failure load, local buckling occurs in the specimens in a certain point at a 90-degree distance from the location of the imperfection. Deformations of Spec1 are less than other specimens, and the deformations of Spec2 are greater than all others. This issue demonstrates the good membrane strength of the healthy tanks with respect to other tanks with imperfections under the external pressure. Also, Spec3, exhibits a good membrane strength with respect to Spec2. It seems that the existence of this type of imperfection in the tanks causes delayed failure with respect to the healthy tanks. In other words, this issue reveals the positive effect of the oblique body imperfection on the buckling behavior of the tanks and their failure.

### 4. Conclusions

Field investigation of steel tanks construction shows that oblique body imperfection after imperfection due to the vertical welding line is the most prevalent type of imperfection seen in the steel tanks. The presence of this imperfection causes reduced created waves in the body of the tanks; the lengths of generated waves are not equal. There are smaller waves at the location of the imperfection and larger waves in the opposite regions. The tanks with oblique body imperfections exhibit good initial strength against buckling due to external pressure so that the generated strains in these tanks at 50% loading causes complete failure, equal to the generated strains in the healthy tank at 20% loading which results in failure. The failure location in the tanks with oblique body imperfection is observed at 90-degree from the imperfection point.

### 5. References

Fatemi SM, Showkati H, Maali M, "Experiments on Imperfect Cylindrical Shells under Uniform External Pressure", *Journal of Thin-Walled Structures*, 2013, 65, 14-25.  
 Cao G, Chen Z, Yang L, Fan H, Zhou F, "Analytical study on the buckling of cylindrical shells with arbitrary thickness imperfections under axial compression", *Journal of pressure vessel technology*, 2015, 137, 1-9.  
 Evkin A, Kolesnikov M, Prikazchikov DA, "Buckling of a spherical shell under external pressure and inward concentrated load", *Journal of Mathematics and Mechanics Solids*, 2016, 1, 1-13.  
 Hutchinson J.W, Thompson J.M.T, "Nonlinear buckling behavior of spherical shells: barriers and symmetry-breaking dimples", *Journal of Philos Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2017, 375, 82-93.