فصلنامه آنالیز سازه – زلزله دوره ۱۲، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۴

بررسی اثر ناکاملی هندسی اولیه بر روی اشکال مدی مخازن فولادی و اسلاشینگ

علی ستاری، دانشجوی کارشناسی ارشد عمران- سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه، مراغه، ایران
احمد ملکی*، استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه، مراغه، ایران

asattari53@yahoo.com
* A.maleki@maragheh_iau.ir.ac

تاریخ دریافت: ۹۴/۵/۱۰ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۴/۱۱/۶

چکیده:

سازه‌های پوسته‌ای جدار نازک دارای وزن سبک و مقاومت بالا می‌باشند ظرفیت باربری، رفتار کمانشی و فراکمانشی مخازن فولادی جدار نازک، به وجود ناکاملی‌های هندسی بسیار حساس می‌باشد. با توجه به کم بودن ضخامت جداره سازه‌های پوسته‌ای امکان ایجاد هرگونه تغییر شکل و اختلال بر روی سطوح دیواره وجود دارد. با توجه به انواع خطا در حین ساخت یا مونتاژ، مخازن طراحی شده بصورت ایده‌آل ساخته نمی‌شوند و دارای مقداری خطای هندسی هستند. این ناکاملی‌ها ممکن است در فرآیند نورد، جابجایی پانل‌ها، نصب یا جوشکار بوجود آیند. گزارش‌های زیادی در باره ناکاملی حاصل از اثر عمل جوشکاری و تاثیر کاهندگی آن بر ظرفیت باربری محوری در دست است.

تحقیقات جامع و کاملی بر روی اثر ناکاملی هندسی اولیه بر روی اشکال مدی مخازن فولادی، و اثر آن بر ظرفیت باربری مخازن فولادی صورت نگرفته که مورد توجه تحقیق حاضر است. در این تحقیق، به بررسی رفتار واقعی پوسته‌های استوانه‌ای دارای ناکاملی هندسی اولیه بر روی اشکال مدی مخازن فولادی در مرحله پیش از کمانش و پس از کمانش، و بررسی اثر ناکاملی هندسی اولیه بر روی اسلاشینگ در مخازن فولادی پرداخته شده است، با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود، ABAQUS و صحت سنجی نتایج حاصل از تحلیل و آنالیز غیرخطی با نتایج آزمایشگاهی پرداخته شده است. ناکاملی هندسی شکل مدها را تغییر داده است. اثر ناکاملی هندسی اولیه روی مقدار اسلاشینگ ناچیز بوده است.

کلید واژگان: ناکاملی هندسی، سازه‌های جدار نازک، مد ارتعاشی، اسلاشینگ، تنش‌های پس‌ماند.

۱- مقدمه

پوسته‌های استوانه‌ای از جمله اصلی‌ترین عناصر سازه‌ها می‌باشند که استفاده از آن‌ها در شاخه‌های مختلف مهندسی به عنوان یک نیاز اساسی محسوب می‌گردد. این سازه‌ها به علت دارا بودن ویژگی‌های ممتاز در رفتار مکانیکی خود، در زمینه‌های مختلف از جمله مخازن مرتفع آب، مخازن ذخیره نفت، سازه‌های دریایی و فرا ساحل، مخازن تحت فشار، سیلوها و کشتی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، ناچیز بودن ضخامت نسبت به دیگر ابعاد سازه آن‌ها را از دیگر سازه‌ها متمایز می کند. پوسته‌های جدار نازک بدلیل سبکی، و عمکردهای فوق العاده‌شان در تحمل بار همواره مورد توجه طراحان سازه بوده است.

کاربرد پوسته‌های استوانه‌ای فولادی بسیار متداول است، اما یکی از مشکلات اساسی استفاده از آنها فرآیند ساخت و مونتاژ می‌باشد. چرا که در این سازه‌ها بعلت وسعت زیاد پوسته، امکان ساخت یکپارچه آن وجود نداشته و پوسته‌ها از تعدادی قطعات پانلی دارای انحناء که به یکدیگر جوش داده شده‌اند ساخته می‌شوند. به همین دلیل امکان بروز یک سری از ناکاملی‌های هندسی بسیار زیاد می‌باشد، با توجه به این که در اکثر مخازن پوسته‌ای در طی فرآیند بهره‌برداری امکان بوجود آمدن مکش (خلاء) زیاد می‌باشد، لذا نیروهای فشاری درجداره لاغر آنها نمو کرده و در صورت فشاری بودن تنش‌ها موجب کمانش و فروریختگی می‌گردد. از جمله مباحث مهم در پوسته‌های جدار نازک، بروز ناکاملی‌های هندسی و میزان تأثیرات کاهنده آنها بر ظرفیت باربری، رفتار کمانشی و فراکمانشی این سازه‌ها می‌باشد. رفتار کمانشی مربوط به ظرفیت بار بحرانی و رفتار فراکمانشی مربوط به رفتار سازه بعد از گذشتن بار از بار بحرانی تا مرحله گسیختگی می‌باشد. ظرفیت بار بحرانی پوسته‌های تحت بارهای مکشی وابسته به دو نسبت لاغری طول به شعاع (L/R) و شعاع به ضخامت (R/t) است. بدلیل تغییر قابل توجه هندسه پوسته در لحظه کمانش لازم است رفتار فراکمانشی تا مرحله خرابی کامل نیز تعیین گردد. بنابراین نازک بودن پوسته از یک سو و فشاری بودن میدان نیروها از سوی دیگر پوسته را در معرض کمانش قرار خواهد داد.

مقدار تأثیر ناکاملی‌های اولیه، به هندسه پوسته، نوع بارگذاری (بارمحوری، خمشی، فشار خارجی و....)، اندازه ناکاملی‌ها و مشخصات مصالح بستگی دارد [۱۰]. ناکاملی‌های هندسی جزء جدایی‌ناپذیر از سازه‌های فولادی هستند که در اثر فرآیندهای مختلف ساخت و مونتاژ، نظیر جوشکاری همواره بوجود می‌آیند. بدلیل کاهش چشمگیر ظرفیتهای کمانشی سازه‌ها در اثر وجود کمترین ناکاملی‌ها، بررسی نحوه ایجاد و تأثیر آنها اهمیت بسیار زیادی پیدا می‌کند [۱]. عوامل متعددی بر این رفتار سازه‌های جدار نازک تأثیر می‌گذارد که مهمترین آنها عبارتند از ناکاملی‌های هندسی، بارگذاری، شرایط مرزی و مشخصات فیزیکی مصالح. از بین این عوامل، ناکاملی هندسی و بارگذاری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. برای دستیابی به تخمین واقع بینانه از مقاومت کمانش پوسته‌ها باید ناکاملی‌های هندسی و بارگذاری در نظر گرفته شود [۱۱]. بررسی‌های تجربی نشان می‌دهند که مقاومت کمانشی یک پوسته بدون نقص هندسی به طور قابل ملاحظه‌ای متفاوت از مقاومت کمانشی همان پوسته با اندکی نقص هندسی است. این ویژگی برخی پوسته‌ها را، در شمار سازه‌هایی قرار می‌دهد که اصطلاحاً حساسیت به ناکاملی دارند [۱۲].

به دلیل ناچیز بودن تحقیقات مربوطه، به بررسی عوامل اثر گذار بر روی ناکاملی هندسی اولیه و نیز تأثیر آن بر روی مدهای ارتعاشی مخازن فولادی پرداخته شد. با ایجاد ناکاملی هندسی اولیه، رفتار کمانشی و پس‌کمانشی مخازن تحت بارگذاری‌های فشار جانبی با استفاده از تحلیل غیرخطی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی بررسی شد.

بخشی از تحقیقات گذشته، شرح ناکاملی هندسی، مشخصات نمونه‌ها و نتیجه اثر ناکاملی هندسی اولیه بر روی اشکال مدی مخازن فولادی در ادامه آورده شد.

شکل ۱- تصویر دو نمونه از فروریختگی‌های مخازن جدار نازک است.

۲- تحقیقات گذشته

کاربرد سازه‌های پوسته‌ای و بررسی پایداری آنها قدمتی دیرینه دارد. تاریخچه بکارگیری معادلات پایداری برای سازه‌های پوسته‌ای به دوران قدیم بر می‌گردد. سپس نظریه تئوریک مسائل مکانیک سازه های پوسته‌ای و روش‌های حل بسیاری درباره آن پای‌ریزی شد و تعداد زیادی از محققین به طور وسیعی به این موضوع پرداخته‌اند. ارائه یک تئوری عمومی برای پوسته‌ها برای اولین بار در نیمه دوم قرن نوزدهم میلادی توسط Love (۱۹۵۹) انجام شد [۱۳].

Donnell (۱۹۳۳) فشار کمانشی بار بحرانی را برای پوسته‌ی استوانه‌ای بدست آورده است [۲]. از آنجایی که ناکاملی هندسی از اهمیت ویژه‌ای در مقاومت کمانشی پوسته‌ها برخورداراست در دهه ۱۹۷۰و۱۹۸۰ میلادی افراد بسیاری بر روی ناکاملی هندسی ناشی از جوشکاری بین صفحات تشکیل دهنده پوسته‌ها تحقیق کردند. طی آزمایشاتی که Dowling و همکارانش در سال (۱۹۸۲) بر روی پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده تحت اثر بار ترکیبی جانبی و محوری انجام دادند، نتیجه گرفتند که نقص هندسی اولیه تأثیر مهمی در خرابی این پوسته‌ها ندارد [۱۴].

Croll , Ellians در سال (۱۹۸۳) محدودیت‌های کمتری برای کمانش ارتجاعی حساس به ناکاملی در مورد خرابی الاستو پلاستیک استوانه‌های با تقویت حلقوی در معرض بارگذاری ترکیبی ارائه داده‌اند. آنها روشی تئوریک برای محدوده وسیعی از انواع بارگذاری و حالت پوسته بدست آوردند [۱۳]. همچنین در مطالعه دیگری , Booton Tennyson (۱۹۷۸) در مورد تأثیر ناکاملی‌های هندسی بر روی بارکمانشی پوسته‌ها تحت بارگذاری فشار جانبی به همین نتیجه رسیدند [۱۳]. Born scheuer در سال (۱۹۸۳)، Theimer در سال (۱۹۸۸) و همچنینRotter و Teng در سال (۱۹۸۹) از جمله کسانی بودند که در تحقیقات خود دریافتند که درز بین صفحات ناشی از فرآیند جوشکاری عامل اصلی انحراف از فرم کلی استوانه می‌باشد [۳].

Showkati(۲۰۰۲) [۲،۴] رفتار کمانشی و فراکمانشی مخازن استوانه‌ای جدار نازک را تحت فشار خارجی یکنواخت برای نمونه‌ها با شرایط مرزی متفاوت تحقیق کرده است. بر پایه این مرجع ناکاملی هندسی، عامل بسیار مهم در رفتار غیر خطی مخازن استوانه‌ای تلقی می‌شود.

با توجه به تأثیر فراوان و کاهنده ناکاملی‌ها در ظرفیت باربری و رفتار کمانشی و فراکمانشی پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک و گستردگی انواع ناکاملی‌های ناشی از جوش و ساخت، رفتار، عملکرد و اندرکنش بین آنها، لزوم مطالعات گسترده و بیشتری در این زمینه احساس می‌شود، ضمن آنکه در اکثر تحقیقات این ناکاملی به صورت مود کمانشی به سازه القا شده و کمتر به صورت یک ناکاملی اولیه مدل گردیده‌اند [۵].

همزمان با مباحث نظری زمینه انجام بررسی‌های آزمایشگاهی روی نمونه‌های با مقیاس واقعی مستندترین و در عین حال پر هزینه‌ترین روش محسوب می‌شود. اما یکی از مسایلی که در روش‌های آزمایشگاهی باید در نظر داشت این است که امکان ساخت نمونه‌ها بدون نقص هندسی وجود ندارد. همین مسئله باعث ایجاد تفاوت‌هایی در جواب های تئوریک و آزمایشگاهی می‌شود. با پدیدار شدن روش‌های عددی تحول عظیمی در حل معادلات دیفرانسیل حاکم به وجود آمد. شایان ذکر است که با توجه به یکنواختی سطح و هندسه ساده پوسته‌های جدار نازک مطالعه رفتار پایداری این نوع از سازه‌ها مبنا و مرجع مناسبی برای مقایسه با حالت‌های پیچیده‌تر و همچنین پوسته‌ها در حالت کلی می‌باشد. بعلاوه معادلات حاکم در پایداری پوسته‌های جدار نازک استوانه‌ای از معادلات پوسته‌های با شکل کلی ساده‌تر است و از مطالعه جداگانه رفتار استاتیکی پوسته‌ها به عنوان مقدمه‌ای برای موضوع پیچیده‌تر پایداری پوسته‌ها می‌توان سود برد [۱۰]. در بررسی رفتار کیفی سازه‌های پوسته‌ای جدار نازک مسئله ناکاملی هندسی بسیار حائز اهمیت است. ناکاملی‌ها به چهار گروه ناکاملی‌های هندسی، بارگذاری، شرایط مرزی و مشخصات فیزیکی مصالح تقسیم‌بندی می‌شوند. ولی آنچه در سازه‌های پوسته‌ای اهمیت دارد ناکاملی هندسی ناشی از نقص هندسی و بارگذاری می‌باشد. در واقعیت پوسته‌های ساخته شده هرگز از لحاظ هندسی کامل نیستند. علاوه بر اینکه یک بارگذاری ایده‌آل را همیشه نمی‌توان با شرایط دلخواه به سازه اعمال کرد.

ناکاملی‌های هندسی و بارگذاری می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر ظرفیت باربری پوسته‌ها داشته باشند در حالیکه تأثیر کمتری بر روی کمانش دیگر سازه‌ها از جمله میله‌ها و صفحات دارند [۶]. از سوی دیگر، در راستای موضوع کمانش ارتجاعی وحساسیت به ناکاملی‌ها در پوسته‌های استوانه‌ای ، Chen, Shen در سال (۱۹۹۱) رفتار کمانشی و پس کمانشی پوسته‌های کامل و ناقص با طول محدود را که در معرض بارگذاری مرکب فشار خارجی و بارمحوری قرار گرفته‌اند بررسی کرده و نتیجه گرفتند که رفتارکمانشی و پس کمانشی پوسته‌های جدار نازک تحت بارگذاری به سه عامل شکل هندسی، بارمتناسب و نقص‌های اولیه بستگی دارد و تغییر در هر یک از عامل‌های گفته شده باعث تغییر در رفتار کمانشی و پس کمانشی پوسته‌های جدار نازک می‌شود [۱۶].

Singer در سال (۲۰۰۴) مطالعات آزمایشگاهی برای پوسته‌های استوانه‌ای ضخیم با نسبت قطر به ضخامت کمتر از ۴۰۰ را انجام داده‌اند [۱۷]. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که پوسته‌های استوانه‌ای در جایی که ناکاملی‌های هندسی اولیه در آنجا بزرگ هستند به صورت موضعی کمانش می‌کنند. Werner Schneider , Andreas Brede در سال (۲۰۰۴) با استفاده از روش غیر خطی المان محدود تأثیر ناکاملی‌های هندسی را بر روی مقاومت کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای تحت فشار خارجی بررسی کرده‌اند. در این تحقیق از مد اول به عنوان ناکاملی استفاده شد [۱۸].

Haim Abramovich, Josef SingerTanchum Weller در سال (۲۰۰۲) مطالعات آزمایشگاهی را برای تعیین بار کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده دارای ناکاملی بررسی کرده‌اند. کار اصلی در این تحقیق بررسی تأثیر ناکاملی هندسی و شرایط مرزی بر روی بار کمانشی می‌باشد [۱۹]. بدین منظور لازم است که رفتار کمانشی و فراکمانشی پوسته‌های استوانه‌ای جدارنازک دارای ناکاملی هندسی اولیه بر روی مدهای ارتعاشی مخازن مورد بررسی و مطالعه دقیق قرار گیرد و به منظور تعیین اثرات ناشی از پارامترهای هندسی از

پوسته‌های استوانه‌ای با نسبتهای هندسی لاغری مختلف استفاده شود [۸].

۳- ناکاملی هندسی و اثرات آنها بر کمانش پوسته‌ها

مسائل پایداری و ناپایداری پوسته‌های جدار نازک از دو نظر اهمیت دارد. نخست اینکه نسبت ضخامت به ابعاد دیگر در اینگونه سازه‌ها بسیار کم است و همین ویژگی مسئله ناپایداری را در آنها برجسته می‌کند. همچنین سازه‌های پوسته‌ای تحت اثر نیروهایی قرار می‌گیرند که این نیروها در آنها میدان تنش‌های فشاری ایجاد می‌نمایند. بنابراین نازک بودن پوسته از یک سو و فشاری بودن میدان نیروها از سوی دیگر پوسته را در معرض کمانش قرار می‌دهد. البته این بدان معنا نیست که سازه‌های پوسته‌ای به دلیل ملاحظات کمانشی ضعیف‌تر از سایر شکل‌های سازه‌ای هستند. زیرا اغلب اینگونه سازه‌ها دارای مقاومت فرا کمانشی هستند. به عبارت دیگر بعضی پوسته‌های جدار نازک پس از وقوع کمانش هنوز هم تاب تحمل بار اضافی را دارا می‌باشند [۱].

ناپایداری ناشی از اثرات دینامیکی و ناپایداری به اصطلاح لرزشی هر دو ناپایداری‌های دینامیکی هستند، به طوریکه حرکت و تعادل از لحاظ دینامیکی ناپایدار شود. ناپایداری دینامیکی به این معناست که سیستم ناپایدار، نوساناتی با دامنه فزاینده دارد. سازه‌های در معرض نیروهای وابسته به زمان و بارگذاری ناگهانی با مدت کم از لحاظ دینامیکی ناپایدار می‌باشند. یکی از مسایل مهم در رفتار مکانیکی پوسته‌ها، مبحث کمانش می‌باشد. فرو ریختن ناگهانی سازه تحت بارگذاری‌های مختلف که همراه با تغییر شکلی بزرگ در سازه صورت می‌گیرد و همیشه تغییر شکل کمانشی عمود بر امتداد تنش‌های کششی است در بررسی رفتار کیفی سازه‌های پوسته‌ای جدار نازک مسئله ناکاملی هندسی بسیار حائز اهمیت است. ناکاملی‌ها به چهار گروه ناکاملی‌های هندسی، بارگذاری، شرایط مرزی و مشخصات فیزیکی مصالح تقسیم‌بندی می‌شوند. ولی آنچه در سازه‌های پوسته‌ای اهمیت دارد ناکاملی هندسی ناشی از نقص هندسی و بارگذاری می‌باشد.

در واقعیت پوسته‌های ساخته شده هرگز از لحاظ هندسی کامل نیستند. علاوه بر اینکه یک بارگذاری ایده‌آل را همیشه نمی‌توان با شرایط دلخواه به سازه اعمال کرد. ناکاملی‌های هندسی و بارگذاری می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر ظرفیت باربری پوسته‌ها داشته باشند درحالیکه تأثیر کمتری بر روی کمانش دیگر سازه‌ها از جمله میله‌ها و صفحات دارند [۲۰]. 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 ابعاد شان از دیگر صفحات بزرگتر است به وجود آید [۱۹].

بررسی‌های تجربی نشان میدهند که مقاومت کمانشی یک پوسته بدون نقص هندسی مخصوصاً در بارگذاری محوری به طور قابل ملاحظه‌ای متفاوت از مقاومت کمانش همان پوسته با اندکی نقص هندسی است. این ویژگی برخی پوسته‌ها را، در شمار سازه‌هایی قرار می‌دهد که اصطلاحاً حساسیت به ناکاملی دارند [۲۰]. حساسیت به ناکاملی پارامتری مهم در تحلیل و طراحی گروهی از سازه‌های پوسته‌ای می‌باشد. برای دستیابی به تخمین واقع بینانه از مقاومت کمانش پوسته‌ها باید ناکاملی‌های هندسی و بارگذاری در نظر گرفته شود [۲۰].

این نوع ناکاملی 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 دلیل بزرگی ابعاد، هندسه پوسته 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 [۲۱].

۴- مشخصات مصالح

با توجه به تحقیقات گذشته و نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی، مشخصات فولاد مصرفی (در جدل شماره۱) و مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی در (جدول شماره ۲) آمده است.

جدول ۱- مشخصات فولاد مصرفی

	ضریب الاستیسیته متوسط (GPa)	تنش تسلیم متوسط (MPa)	تنش گسیختگی متوسط (MPa)	کرنش نظیر نقطه گسیختگی (٪)
فولاد نرم مبارکه	۲۰۰	۱۹۴/۲۴	۳۲۵/۴۹	۳۰/۲۴

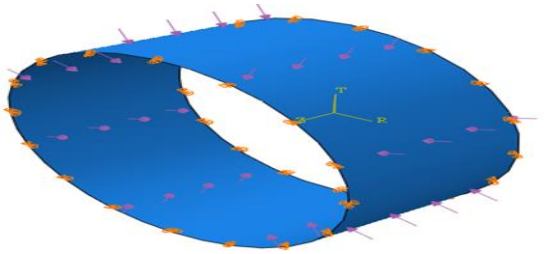
جدول ۲ – مشخصات نمونه‌های مورد استفاده در آزمایشگاه و نرم‌افزار

نامگذاری	L/R	R/t	مقدار فرو رفتگی	ضخامت پوسته	ارتفاع پوسته
SCSP	1	600	Perfect	0.5mm	300 mm
SCS4	1	600	4t		
SCS8	1	600	8t		
DCSP	1.5	600	Perfect	0.5mm	450 mm
DCS4	1.5	600	4t		
DCS8	1.5	600	8t		
SCTP	1	500	Perfect	0.6mm	300 mm
SCT4	1	500	4t		
SCT8	1	500	8t		
DCTP	1.5	500	Perfect	0.6mm	450 mm
DCT4	1.5	500	4t		
DCT8	1.5	500	8t		

۵- مدل سازی در نرم افزار

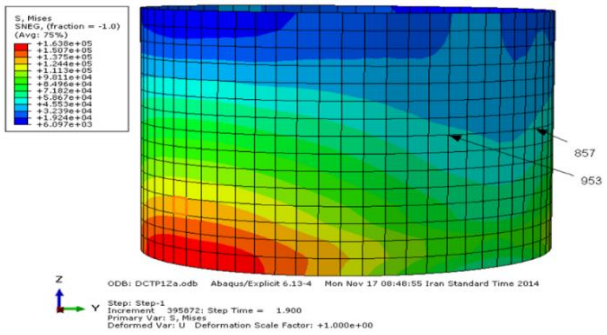
همه‌ی نمونه‌های آزمایشگاهی در نرم‌افزار ABAQUC مدل شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدند، جهت بار گذاری، از بار گسترده بر روی سطح جانبی پوسته استفاده شد. شرایط تکیه‌گاهی در لبه پایین و بالای استوانه به صورت کاملاً مفصلی و نمونه در لبه پایینی در چهار نقطه در راستای طولی بسته است. در شکل ۲ تصویر نمونه بارگذاری شده و شرایط مرزی لبه‌ها مشخص است.

در اکثر مقالات مربوط به پوسته های جدار نازک، اثر بار محوری و ناکاملی‌های حاصل از اثر جوشکاری تحقیق شده است. لذا جهت کالیبره نموده نمونه‌ها و اطمینان از صحت نتایج تحلیل‌ها، تحلیل خطی انجام گردید و نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی برابری می‌کند. این تساوی، نشان می‌دهد که روند مدل‌سازی، معرفی مشخصات مکانیکی و شرایط مرزی و بارگذاری نمونه‌ها صحیح است. پس از اطمینان از صحت نتایج، با اعمال درصدی از اثر ۵ مد اول تحت آنالیز قرار گرفتند. برای ایجاد اثر ناکاملی هندسی اولیه بر مد شکل‌ها روی نمونه بعد از تحلیل Buckle، به میزان ۰،۰۰۰۱ درصد از مد اول و ۰،۰۰۰۰۱ درصد از مدهای دوم تا پنجم را به نمونه اعمال شدا و نمونه مجدداً تحلیل Buckle شد [۸].

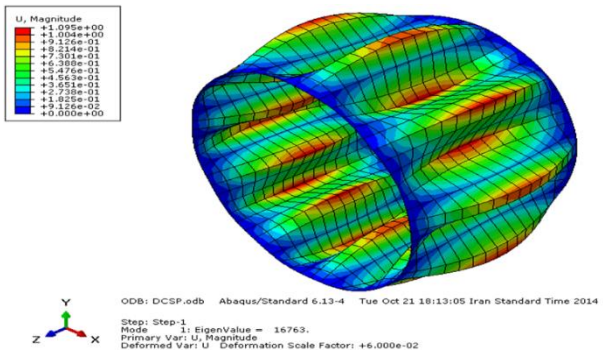


شکل ۲-بارگذاری و شرایط مرزی لبه ها، نمونه DCTP

شکل۳ تصویر مد اول کمانشی نمونه DCTP، است، و شکل ۴ محل گره‌های انتخاب شده برای رسم نمودار حرکت گره در مدهای مختلف سازه نشان داده شده است.

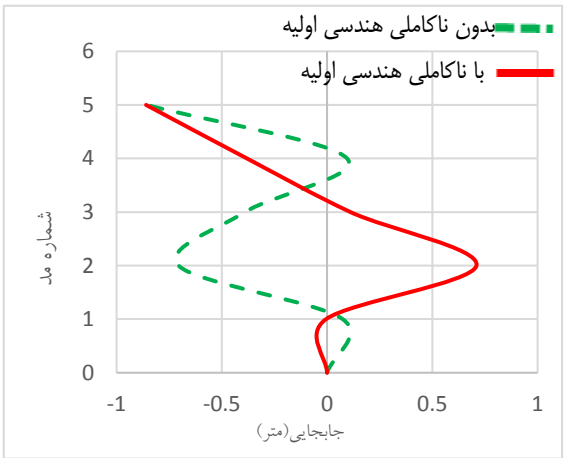


شکل ۳- مکان و شماره گره نمونه DCTP

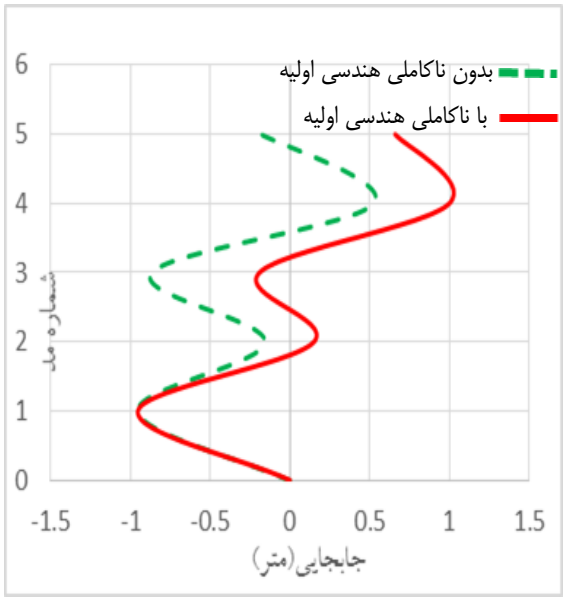


شکل ۴- مد اول کمانشی نمونه DCTP

شکل‌های ۵ و۶ نمودار شکل حرکت یک گره درمدهای مختلف برای نمونه DCTP، برای حالت بدون ناکاملی هندسی اولیه و با ناکاملی هندسی اولیه است.

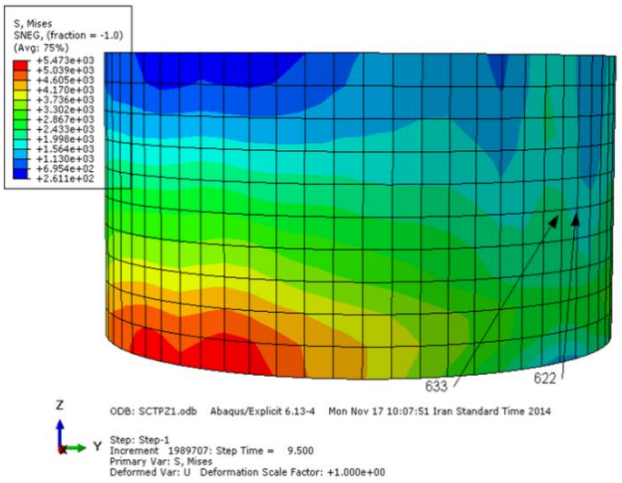


شکل ۵- نمودار شکل حرکت گره شماره ۸۵۷ نمونهDCTP

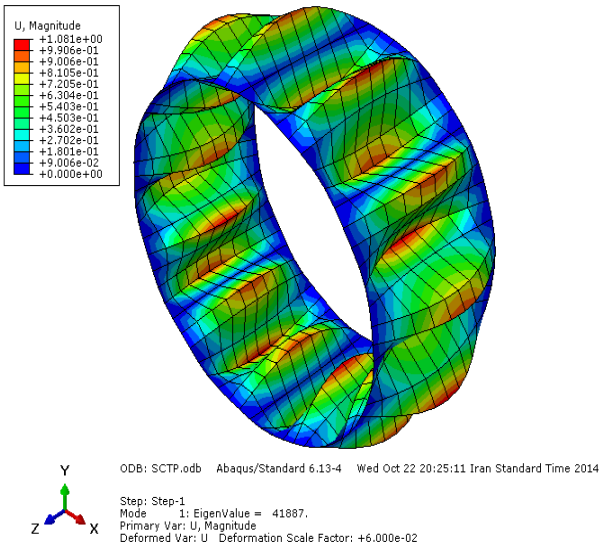


شکل ۶- نمودار شکل حرکت گره شماره ۹۵۳ نمونهDCTP

شکل ۷ محل گره‌های انتخاب شده برای رسم نمودار حرکت گره در مدهای مختلف سازه و شکل۸ تصویر مداول کمانشی نمونه SCTP است را نشان میدهد.

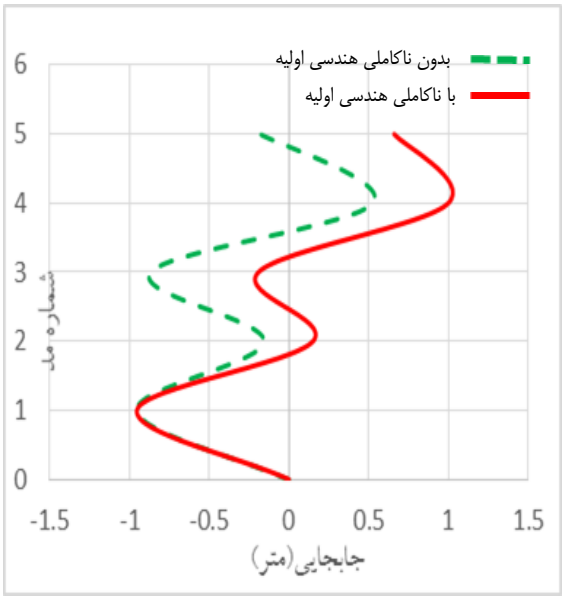


شکل ۷- مکان و شماره گره نمونه SCTP

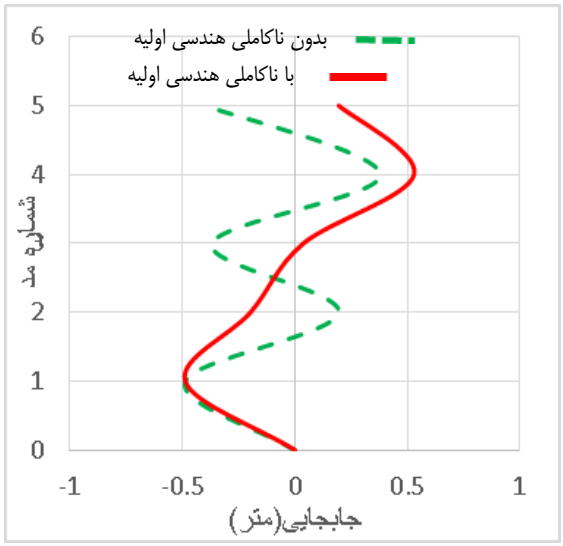


شکل ۸- مد اول کمانشی نمونه SCTP

شکل‌های ۹ و۱۰ نمودار شکل حرکت یک گره درمدهای مختلف برای نمونه SCTP است



شکل ۹- نمودار شکل مدها برای گره ۶۲۲ نمونه SCTP



شکل ۱۰- نمودار شکل مدها برای گره ۶۳۳ نمونه SCTP

۶- اسلاشینگ

در مسائل اسلاشینگ می‌توان آب را به صورت یک ماده تراکم ناپذیر و غیر چسبناک در نظر گرفت. یک روش بسیار موثر برای مدل سازی آب در Abaqus/Explicit استفاده از یک مدل برشی ویسکوز نیوتنی (Newtonian) و یک معادله حالت خطی برای پاسخ بالک است. مدل بالک به عنوان یک پارامتر جبرانی برای قید تراکم ناپذیری عمل می‌کند.

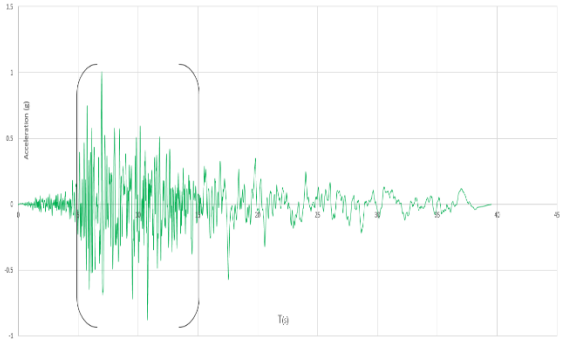
از آنجایی که مسئله اسلاشینگ یک مسئله غیر محدوده فضایی است، مدل بالک انتخابی می‌تواند یک دوم تا یک سوم مدل بالک انتخابی واقعی انتخاب گردد، به طوری که هنوز یک رفتار تقریباً تراکم ناپذیری را از خود نشان دهد [۷]. هم چنین ویسکوزیته برشی به عنوان یک پارامتر جبرانی جهت فرونشاندن مودهای برشی (که می‌تواند سبب به هم ریختگی مش‌بندی گردد) عمل می‌کند. از آنجایی که آب یک ماده غیره چسبناک می‌باشد لازم است ویسکوزیته برشی انتخاب شده برای آن کوچک باشد. توجه به تحقیقات گذشته و نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی، مشخصات نمونه‌ها در جدول۳ آورده شده است.

جدول ۳ – مشخصات نمونه‌های مورد استفاده

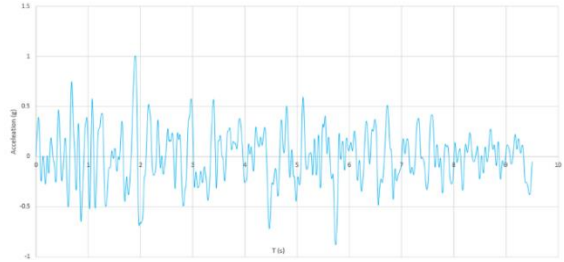
نامگذاری	L/R	R/t	ضخامت پوسته	ارتفاع پوسته
نمونه آزمایشگاهی	1	600	0.5 mm	300 mm
نمونه واقعی	1	600	10mm	6000mm

۷- مدل سازی اسلاشینگ

جهت کالیبره نموده نمونه‌ها و اطمینان از صحت نتایج تحلیل‌ها، تحلیل خطی انجام گردید و نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی [۹] مقایسه گردیده است و نتایج یکسان بوده است. بنابراین روند مدل‌سازی، معرفی مشخصات مکانیکی و شرایط مرزی و بارگذاری نمونه‌ها صحیح بوده است. پس از اطمینان از صحت نتایج، با اعمال درصدی از مجموع ۵ مد اول ارتعاشی [۶] همراه با شتاب افقی زلزله السنترو در بازه زمانی ۵ تا ۱۵ ثانیه به نمونه‌ها اعمال شده و نمونه‌ها مجدداً تحلیل شده‌اند. در شکل۱۱نمودار شتاب زمان زلزله السنترو ۱۹۴۰ و شکل ۱۲ نمودار شتاب زمان زلزله السنترو در بازه زمانی ۵ تا ۱۵ ثانیه ارائه شده است.



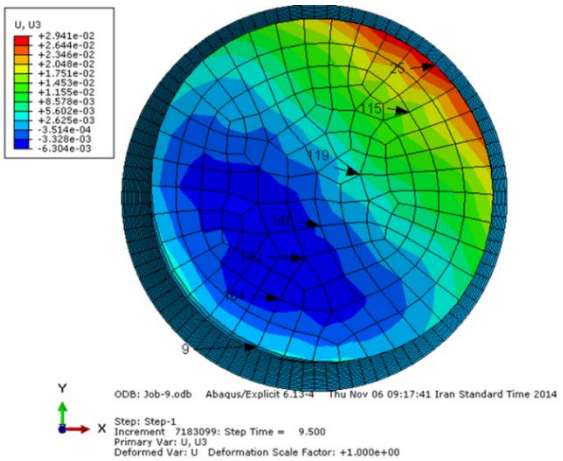
شکل ۱۱- نمودارمنحنی شتاب زمان زلزله ال سنترو ۱۹۴۰



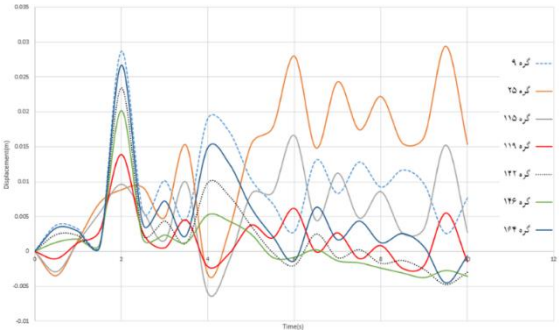
شکل ۱۲- نمودار منحنی شتاب زمان زلزله ال سنترو ۱۹۴۰برای بازه ۵ تا ۱۵ ثانیه

در شکل۱۳ کانتور تغییر مکان سطح مایع و شماره گره و

درشکل۱۴ نمودار تغییر مکان سطح آب (اسلاشینگ) برای گره‌های مشخص شده در نمونه آزمایشگاهی ارائه شده است.

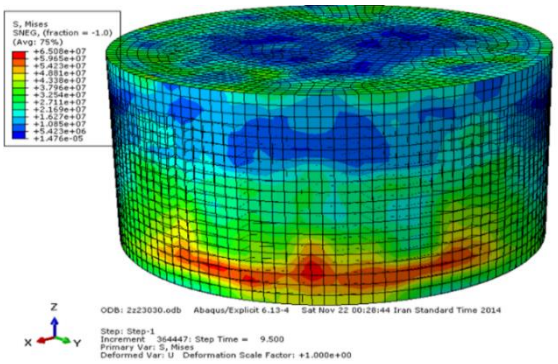


شکل ۱۳-کانتور تغییر مکان و شماره گره در نمونه آزمایشگاهی

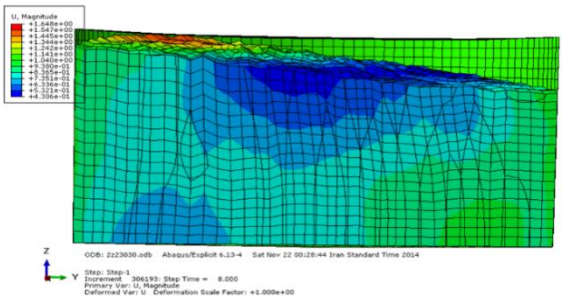


شکل ۱۴- نمودار تغییر مکان سطح آب (اسلاشینگ) برای گره‌های مشخص شده در نمونه آزمایشگاهی

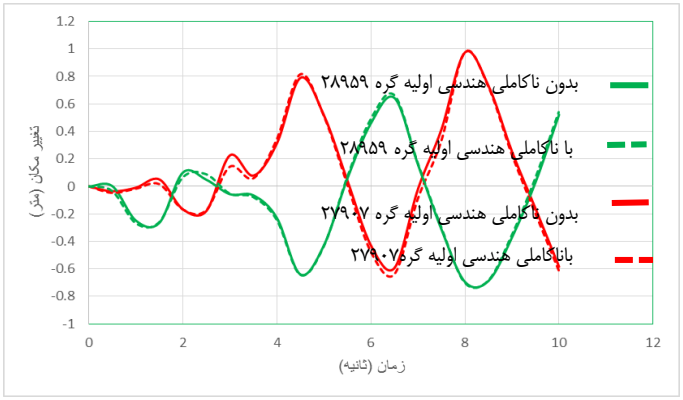
در شکل۱۵ بیشترین مقدار تنش فن میسز در دیواره مخزن در محلی که معمولا استعداد ایجاد کمانش پافیلی را داراست بوجود آمده است. درشکل۱۶ کانتور تغییر مکان سطح مایع داخل مخزن برای نمونه واقعی و در شکل۱۷ نمودار تغییر مکان سطح آب (اسلاشینگ) برای نمونه واقعی تحت اثر نیروی افقی زلزله ارائه شده است.



شکل ۱۵- کانتور تنش در دیواره مخزن نمونه واقعی



شکل ۱۶- کانتور تغییر مکان سطح مایع داخل مخزن نمونه واقعی



شکل ۱۷- نمودار تغییر مکان سطح آب (اسلاشینگ) برای نمونه واقعی تحت اثر نیروی افقی زلزله

۸- نتیجه گیری

۱- اغلب شکل مدها در مد اول تفاوت چندانی باهم نداشته‌اند و بعد از مد اول، تغییر جهت داده اند.

۲- اغلب شکل مدها و در مدهای بالاتر باهم تلاقی دارند اما جهت حرکتشان یکی نبوده است.

۳- در بعضی از مدها جهت حرکت شکل مدها و مقدار آنها قرینه همدیگر بوده است. بعنوان مثال شکل مدها در گره۷۹۰ برای مدهای دوم، سوم و چهارم بدین صورت بوده است.

۴- با تغییر ضخامت در نمونه شکل مدها تغییر کرده است. و هیچگونه همخوانی با حالت قبل نداشته است. اثر ناکاملی هندسی اولیه بر روی تغییر مکان سطح آب (اسلاشینگ) ناچیز بوده است.

۵- برای حالتی که نمونه واقعی تا ارتفاع ۵ متری، از ۶ متر ارتفاع نمونه، حاوی آب بوده است ارتفاع موج در سطح بالایی آب به ۱ متر رسیده است.

۶- برای حالتی که نمونه واقعی تا ارتفاع ۵ متری، از ۶ متر ارتفاع نمونه، حاوی آب بوده است ارتفاع ماکزیمم موج در لحظه شتاب ماکزیمم اتفاق نیفتاده است.

۷- با افزایش شتاب و مدت زمان زلزله، احتمال تشکیل موج با ارتفاع بیشتر وجود دارد.

۸- در صورت ناکافی بودن ارتفاع سطح آب تا زیر سقف در اثر برخورد موج به سقف باعث ایجاد آسیب در آن می‌شود.

۹-منابع

[۱]- فاطمی، م . (۱۳۸۹) « بررسی اثر ناکاملی‌های هندسی طولی در رفتار کمانشی و فراکمانشی پوسته‌های استوانه‌ای جدارنازک تحت بارگذاری جانبی با روش آزمایشگاهی » پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران – سازه ، گروه عمران ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه.

[۲]- شوکتی ، ح. (۱۳۸۰) «بررسی آزمایشگاهی رفتار کمانشی و فراکمانشی پوسته‌های استوانه‌ای با تکیه گاه ساده» اولین کنفرانس سازه‌های جدار نازک ، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه.

[۳]- فرشاد ، م . (۱۳۶۴) « ساختمان های پوسته‌ای» جداول ، چاپ دوم ، انتشارات دانشگاه شیراز.

[۴] –شوکتی ، ح. (۱۳۸۱) «رفتار غیر هندسی خطی پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری خارجی یکنواخت» ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران ، دانشکده مهندسی عمران ، دانشگاه اصفهان.

[۵] –فرشاد ، م . (۱۳۶۴) « ساختمان های پوسته‌ای» جداول ، چاپ دوم ، انتشارات دانشگاه شیراز.

[۶]- ملکی، ا. (۱۳۹۳) «جزوه آموزشی نرم فزار آباکوس» گروه عمران ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه.

[۷]- صدیقیانی ، ک و آیت الهی ، م ، ر . (۱۳۹۳) « تحلیل اجزاء محدود؛ تئوری و کاربرد در ABAQUS»چاپ ششم، انتشارات اندیشه سرا.

[۸]- ملکی، ا. (۱۳۹۳) «جزوه آموزشی نرم فزار آباکوس» گروه عمران ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه.

[۹] –فاطمی، م . (۱۳۸۹) « بررسی اثر ناکاملی‌های هندسی طولی در رفتار کمانشی و فراکمانشی پوسته‌های استوانه‌ای جدارنازک تحت بارگذاری جانبی با روش آزمایشگاهی » پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران – سازه ، گروه عمران ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه.

[10] - Miller, C.D (1999). Shell Structure. CRC press LIC.

[11]- Farshad , M. (1994). “ Stability of Structures ”. 2nd ed., Mc Grow Hill, New York..

[12]- Timoshenko, S.P., Gere, I.M. (1961). Theory of Elastic Stability, 2th ed., Mc Grow Hill, New York.

[13] -Love, A.E.H. (1959). A treatise on the mathematical theory of elasticity, 4th ed., Dover Publisher, New York.

[14]- Holst, G.G Roter, J.M., Colladine, Ch.R. (1999) “ Imperfection in Cylindrical Shells resulting from fabrication misfits” Journal of Engineering Mechanics, Vol.125 No4, pp.410-418.

[15]- Showkati, H., Ansourian, H,.(1995)”Influence of primary boundary conditions on the buckling of Shallow cylindrical shells” Constructional steel Research,Vol.36,No. 1. pp. 53-75.

[16] -Ellians, C.P., Croll, J.G.A. (1983) “Elastic-plastic general buckling of ring-stiffened cylinders collapse, the buckling of structures in theory and practice”Ed: Thompson& Hunt, Cambridge Press, pp.93-109.

[17]- Dowling, P., Hardnig, J.E., Agelidis, N., Fahy, W. (1982) “Buckling of orthogonally stiffened cylindrical shell used in offshore engineering” Proceeding colloquium, university of Stuttgart, Germany, pp.239-274.

[18]- Shen, H . Sh , Chen, T.Y (1991) “Buckling and post buckling Behavior of cylindrical shells

under combined external pressure and axial compression". J Thin-Walled.
[19]- Brush, D.O., Almorth, B.O. (1975). Buckling of Bares, Plates and Shells, Mc Grow Hill, New York.
[20]- Abramovich. H., Singer. J., Weller. T. (2002) "Repeated buckling and its influence on the geometrical imperfections of stiffened cylindrical shells under combined loading" International Journal of Non-linear Mechanics 37-577-588.
[21]- Holst, G.G Roter, J.M., Colladine, Ch.R. (1999) " Imperfection in Cylindrical Shells resulting from fabrication misfits" Journal of Engineering Mechanics, Vol.125 No4, pp.410-418.

Evaluation of initial imperfection mode shapes and slashing of steel tanks

A.Sattari
Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Maragheh Branch, Maragheh, Iran
*A.Maleki
Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Maragheh Branch, Maragheh, Iran

ABSTRACT

Thin wall shell structure has low weight and high resistance. The load capacity, buckling behavior and post buckling behavior of steel tanks thin wall, is very sensitive to geometric imperfections. Due to the small wall thickness of the shell structures enabling the creation of any deformation and there is a disturbance on the surface of the wall. Considering the types of errors occurred when build or assembled these structures, are not built these structure, ideally. This imperfections may be in the process of rolling, removable panels, installation or welding arise. Incomplete reports about the negative impact of the effect of welding on the axial bearing capacity.

Comprehensive research on the effects of imperfection of initial geometrical shape on the steel tank vibration modes, and its effect on the bearing capacity steel storage tanks that considerable research It's not done. In this research, the actual behavior of cylindrical shells with initial geometric imperfections on mode shapes steel tanks in the pre-buckling and post-buckling. And the effect of initial geometric imperfections on steel tanks slashing been paid. Using finite element software, ABAQUS, and verification of the results of the analysis and nonlinear analysis with experimental results. Been paid. Imperfect geometric shape has changed mods. The effect of these changes on slashing are very small.

Keywords: geometrical imperfection, thin wall structures, mode shapes, slashing, residual stresses.