



بررسی اثر نقص تحت اثر بارهای مرکب در سیلوهای فلزی با استفاده از شبکه های عصبی بنیادی شعاعی

ناصر ابوطالب^{۱*}، امین قربانی^۲، مونا علیزاده گیاشی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد، فومن، ایران

۲- استادیار، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵، تهران، ایران

۳- استاد، دانشگاه غیرانتفاعی اندیشمند، لاهیجان، ایران

چکیده

خرابی و کمانش در سازه های پوسته ای، از جمله سیلوها، میتواند به دلایل مختلفی از جمله اعوجاج، نقص های ایجاد شده در زمان ساخت، نقص های ایجاد شده در طول بهره برداری و یا عوامل محیطی و غیره ایجاد گردد. سیلوها می توانند تحت اثر انواع بارهای جانبی و محوری قرار بگیرند، اما از آنجایی که در واقعیت تحت تاثیر توامان این بارها هستند، از آن جهت رفتار سیلوها تحت اثر بارهای مرکب مورد بررسی قرار می گیرد. سیلوهایی مورد نظر در این پژوهش از نوع گرم نورد شده و قرار گرفته بر روی زمین می باشند. متغیرهای این پژوهش نوع و دامنه نقص می باشد. همچنین سیلوها در دو حالت نیمه پر و پر مورد ارزیابی و بررسی قرار می گیرند. سیلوهایی مدل شده در نرم افزار ANSYS مورد بررسی قرار گرفتند. شبکه عصبی بنیادی شعاعی RBF برای پیش بینی ظرفیت کمانش پوسته های استوانه ای استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان می دهد شبکه های عصبی مصنوعی ابزار مناسبی برای پیش بینی ظرفیت کمانش سیلوهایی دارای نقص می باشند.

کلمات کلیدی: سیلوهایی فولادی، نقص، بار مرکب، شبکه عصبی

*نویسنده مسئول: ناصر ابوطالب

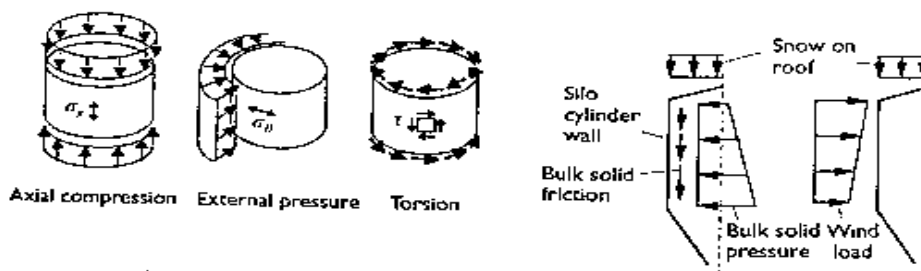
پست الکترونیکی: nasser.abootaleb@gmail.com

۱- مقدمه

اولین تئوری کمانش پوسته های استوانه ای، تحت فشار محوری بیان شد. مقاومت یک استوانه تحت فشار محوری، به طور معمول با تنش کمانشی خطی یک پوسته کامل تحت شرایط ایده آل (طول متوسط، تنش های پیش کمانش که تحت تاثیر شرایط مرزی قرار ندارند، مرزهایی که از تغییر شکل های پیرامونی جلوگیری می کنند) برابر می باشد. این تنش کمانش، به طور مستقل بوسیله لورنز [۱]، تیموشنکو [۲]، و ساوتل [۳] کشف گردید و با عنوان تنش بحرانی الاستیک کلاسیک شناخته می شود. آزمایشات، فلوگه [۴] و لاندسکویت [۵] نشان می دهد که کمانش استوانه های واقعی در آزمایشات تجربی کمتر از ۳۰٪ تئوری کلاسیک بوده است. این نتایج پراکنده و اختلافات، منجر به انجام تحقیقات بیشتری در دهه های اخیر شده است که این اختلافات در پوسته های استوانه ای تحت فشار محوری کمتر آشکار می شود. و همچنین به دلیل اهمیت اقتصادی، حساسیت بالای عیوب هندسی و سادگی آزمایش در پوسته های استوانه ای، مطالعات وسیعتری نسبت به دیگر پوسته ها انجام شده است. اختلافات بزرگی بین تئوری های عددی و تجربی وجود دارد که از آن میان می توان به چهار عامل، تغییر شکل پیش کمانش و تغییرات آن در تنش، شرایط بین مرزی، خروج از مرکزیت و غیریکنواختی در بارها یا تکیه گاه ها و نقص های هندسی و تنش های پسماند اشاره کرد.

سازه هایی که در معرض فشار داخلی قرار می گیرند، مستعد به کمانش اولری می باشند و تنش کمانش اولری زمانی دارای بیشترین مقدار است که کل مصالح تا حد ممکن در فاصله دورتری از محور قرار گرفته باشند. این موضوع، پوسته یا لوله استوانه ای را به موثرترین شکل برای اجزای فشاری تبدیل می کند. با نازک تر شدن دیواره پوسته، شکل های موضعی کمانش ایجاد می شوند و مقاومت استوانه های جدار نازک را کنترل می کنند. این نوع اجزای فشاری شامل هواپیما، فضاپیما، وسایل نقلیه نقلیه زمینی و همچنین اجزای پل ها، سکوهایی داخل دریا و سازه های عمرانی دیگر می شوند. همچنین سازه های پوسته ای برای محدود کردن سیالات و جامدات با استفاده از مخازن جدار نازک مورد استفاده قرار می گیرند.

رفتار پوسته های استوانه ای تحت هرکدام از بارهای بنیادی نظیر فشار محوری، فشار خارجی و پیچش خالص (شکل ۱-۱۳) به خوبی بررسی و درک شده است. آنچه معمولاً در عمل اتفاق می افتد وارد شدن ترکیبی از بارهای وارده بر پوسته ها می باشد. به بیان دیگر در عمل پوسته ها کمتر تحت بارهای خالص محوری یا برشی قرار می گیرند.



شکل ۱: بارهای بنیادی و مثال ترکیب بار [۶].

محاسبه توزیع واقعی تنش در پوسته اغلب بسیار مشکل است و به طور قابل توجهی با تئوری تیر متفاوت می باشد. لذا جهت طراحی ایمن اینگونه مخازن که تحت بارگذاری مرکب قرار دارند باید پارامترهای شامل منحنی بار-تغییر مکان و تمامی مشخصه های پایداری یک ترکیب بار پیچیده مورد بررسی قرار گیرند. قابل ذکر است، فقط در صورتی که تمامی موده های ویژه خرابی ناشی از ماکزیمم تنش های مختلف، به طور آشکاری قابل جداسازی باشند (نظیر کمانش پلاستیک ناشی از هرکدام از تنش های فشاری محوری و یا تنش های برشی در مورد پوسته های استوانه ای تحت خمش و برش جانبی) می توان از بر هم کنش این آثار در تحلیل کمانش صرف نظر کرد.

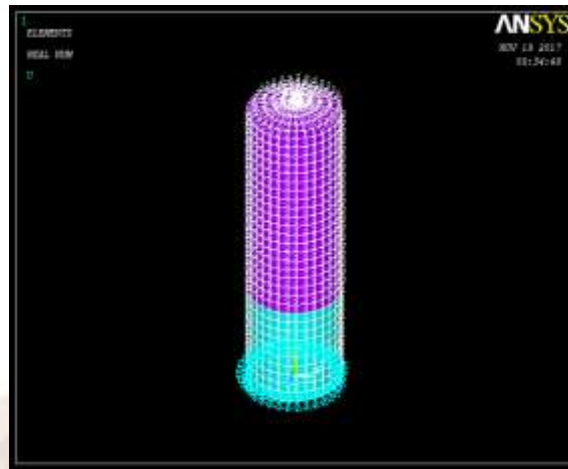
فشار داخلی بر بار بحرانی کمانش پوسته های استوانه ای مؤثر است. از اینرو بررسی اثر فشار داخلی بر رفتار پوسته های استوانه ای تحت فشار به منظور بررسی رفتار سازه های پوسته ای استوانه ای تحت اثر فشار داخلی را ضروری می نماید. اشنل [۷] فشار داخلی بر رفتار پس کمانش پوسته های استوانه ای ایده آل را مورد بررسی قرار داد. نتایج تحقیقات اشنل نشان می دهد که، فشار داخلی در پوسته های استوانه ای تحت تأثیر فشار محوری موجب نرم شدن رفتار پس کمانشی می شود. علاوه بر این با افزایش میزان فشار داخلی، نرخ تغییرات تنش-تغییر طول محوری کاهش می یابد.

۲- روش تحقیق

این پژوهش که بر پایه تحلیل های عددی انجام می شود به بررسی اثر نقص خوردگی در نوار پایینی سیلو (که طبق مطالعات پیشین بحرانی ترین قسمت از نظر وجود نقص می باشد) بر ظرفیت کمانشی سیلوهای فولادی تحت اثر بارگذاری مرکب در سه حالت خالی، نیمه پر و پر پیش بینی آن توسط شبکه های عصبی می پردازد. برای این امر به ساخت ۱۳۵ مدل در نرم افزار اجزاء محدودی ANSYS پرداخته شد و نتایج آن در نرم افزار ECXEL بررسی و در محیط برنامه MATLAB تحت آموزش و آزمایش قرار گرفت تا عملکرد سیلوهای فولادی تحت اثر بارهای مرکب در شرایط مختلف وضعیت داخلی سیلو مورد مقایسه و تحلیل قرار گیرد.

۳- نوع الگوی خوردگی نقص های سیستماتیک

یکی از اهداف اصلی این تحقیق تعیین اثر خوردگی بر ظرفیت کمانشی سیلوها است. طبق مطالعات پیشین، که به بررسی چهار الگوی خوردگی پرداخت شد، دریافت شد که بحرانی ترین حالت نقص زمانی اتفاق می افتد که، نقص در یک سوم پایینی سیلو اعمال شود. ازینرو، در این پژوهش نقص ها در بحرانی ترین حالت خود مورد مطالعه قرار گرفته اند. الگوهای بررسی شده ی پیشین عبارتند از: الگوی اول بیانگر شرایطی است که در سیلوها هیچ گونه خوردگی رخ نداده است. الگوی دوم بیانگر بحرانی ترین حالت مربوط به خوردگی است در این حالت فرض شده است که در سیلوها خوردگی در نوار یک سوم پایینی پوسته رخ داده است. در الگوی سوم فرض شده است که خوردگی سیلو در نوار یک سوم میانی پوسته رخ داده است. و در الگوی چهارم فرض شده که خوردگی سیلو در نوار یک سوم بالایی رخ داده است. بدیهی است امکان رخ دادن هرکدام از چهار الگوی مذکور و یا حتی الگوهای دیگر وجود دارد. هرکدام از الگوهای مذکور با توجه به مشاهدات عینی صورت گرفته در سیلوهای فلزی نگهداری گندم موجود در سطح استان گیلان، قزوین و تهران انتخاب شده بودند. شایان ذکر است میزان خوردگی در تمامی حالات برابر با ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ میلیمتر در نظر گرفته شده است.



شکل ۲: نمونه سیلوی فولادی ۱۵ متری دارای نقص خوردگی در نوار یک سوم پایینی.

مهم ترین عامل بررسی اختلاف بین نتایج عددی و تجربی برای پوسته های استوانه ای ایزوتروپ به طور گسترده، مطالعه نقوص هندسی اولیه در پوسته ها می باشد. گستره عظیمی از تحقیقات به حساسیت نقوص کمانش پوسته در شرایط مختلف بارگذاری می پردازد. یاماکی [۸]، کویتر [۹] و دونل [۱۰] مطالعات بسیاری در این زمینه انجام داده اند.

مطالعات کویتر در پوسته های همراه با نقص نشان میدهد که نقص ممکن است برای مقاومت پوسته بسیار خطرناک باشد که منجر به کاهش آن تا ۲۴٪ تنش بحرانی کلاسیک، برای نسبت دامنه به ضخامت یک $\left(\frac{\omega_0}{t}\right) = 1$ می گردد.

۴- الگوی بارگذاری

با توجه به اینکه برای تحلیل پوسته ها از روش کنترل تغییر مکان استفاده شده است، برای تمام نمونه ها تغییر مکان موردنظر به بالای نمونه ها اعمال گردیده است. این تغییر مکان بوسیله یک ماکرو نوشته شده که بصورت فزاینده از یک مقدار نزدیک به صفر شروع شده و با گام های ثابت افزایش می یابد. این موضوع تا جایی ادامه پیدا میکند که هنگام حل، مسئله همگرایی در نقطه ای از بارگذاری ارضاء نشود. در این پژوهش الگوی بارگذاری زیر مورد استفاده قرار گرفته است.

بار مرکب: بدین منظور درصدی از بار جانبی مانند نیرو به نودهای بالایی سیلو وارد شده، سپس بار محوری بصورت فشاری به گره های بالای سیلوهای فولادی اعمال گردیده است.

در این پژوهش درصد اعمال بار جانبی جهت بررسی بار مرکب در سه حالت ۰/۳۵، ۰/۶۵ و ۱ در نظر گرفته شده است.

۵- فرضیات مدل و روش مورد استفاده در تحلیل های عددی

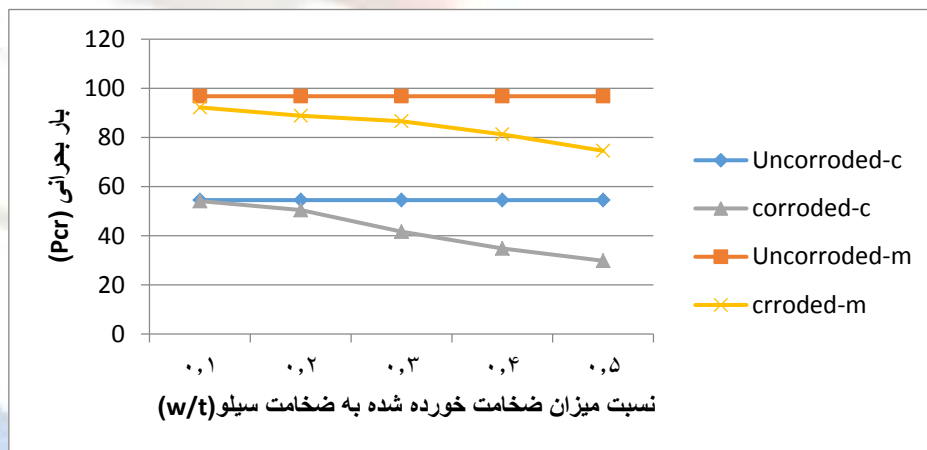
در این پژوهش برای دستیابی به بار کمانشی سیلوهای فولادی دارای نقص خوردگی، از تحلیل های عددی بر روی سیلوهای با ارتفاع ها و ضخامت های متفاوت استفاده شده است. همچنین این سازه ها، تحت بارگذاری مرکب قرار گرفته و تحت فشارهای داخلی مختلف (خالی، نیمه پر و پر) مورد بررسی واقع شده اند تا ضمن به دست آوردن ظرفیت پایداری سیلوها نتایج حاصله از روی نمودار های ترسیم شده، ارزیابی و تفسیر می گردند. قابل ذکر است که برای انجام تحلیل های عددی از نرم افزار ANSYS استفاده شده است. المان بکار گرفته شده در این تحلیل ها المان SHELL 181 می باشد. این المان هم می تواند قابلیت غیرخطی بودن مصالح و هم غیرخطی بودن

هندسی را در تحلیل های استاتیکی غیرخطی فزاینده در نظر بگیرد. در تحلیل های انجام گرفته سه ارتفاع ۵، ۱۰ و ۱۵ متر از سیلوهای فلزی با ضخامت های متفاوت ۸، ۱۰ و ۱۲ میلی متر به طوریکه در تمامی مدل های تحلیلی قطر سیلوهها ثابت و برابر ۵ متر است، مورد بررسی قرار گرفته اند. پوسته ی سیلوهها با تغییر شکل های بزرگ و تکیه گاه ها گیردار، در نظر گرفته شده اند.

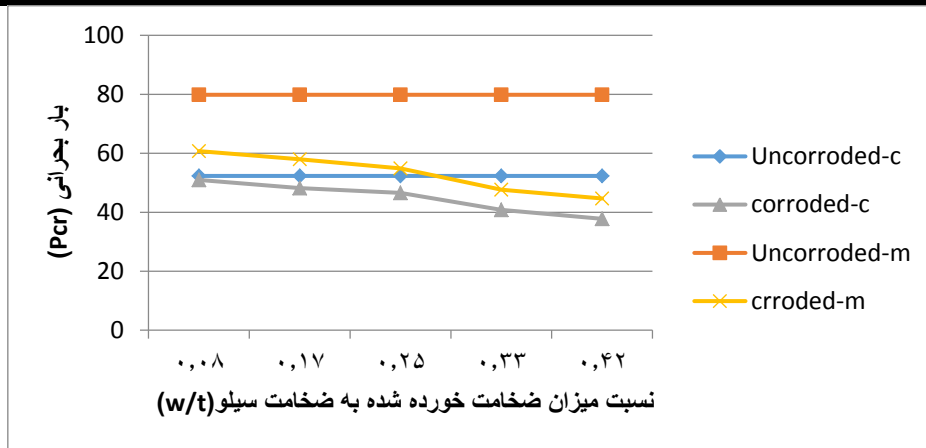
۶- نتایج تحلیل های عددی

۶-۱- اثر فشار داخلی بر ظرفیت کمانشی سیلوهای فولادی نسبت به ضخامت آن

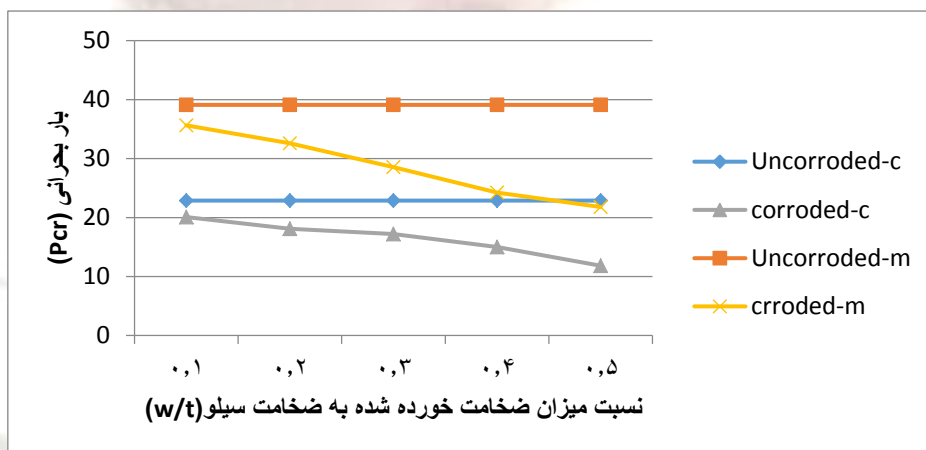
به منظور بررسی میزان اثر فشار داخلی بر کمانش سیلوهها سه حالت مختلف خالی، نیمه پر و پر در نظر گرفته شده است. میزان خوردگی سیلوهها در نوار یک سوم پایینی پوسته از ۱ تا ۵ میلیمتر متفاوت است. از آنجایی که در واقعیت بارگذاری ها شامل ترکیبی از بارگذاری های محوری و جانبی است، در این پژوهش نیز به بررسی رفتار کمانشی سیلوهها تحت تاثیر بارهای مرکب پرداختیم که هر بار با در نظر گرفتن درصدی از نیروی جانبی (۳۵٪، ۶۵٪ و ۱۰۰٪) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تحلیل های سیلوهای فولادی با نقص خوردگی تحت بار مرکب به ازای فشار داخلی نیمه یا کامل به ترتیب در شکل های زیر نشان داده شده است. یعنی مدل های ۵، ۱۰ و ۱۵ متری در ضخامت ها ۸، ۱۰ و ۱۲ میلیمتر هرکدام به طور جداگانه به ازای اینکه نقص خوردگی تحت بار مرکب در سیلوی پر یا نیمه پر اعمال شده باشد با مدل سالم آن مقایسه شده است. همانطور که دیده شد افزایش میزان خورده شده در نقص خوردگی به ضخامت سیلو باعث کاهش بار بحرانی کمانش می شود. همچنین مشاهده می شود که بارهای بحرانی کمانش زمانی که سیلوهها پر باشند بحرانی تر از زمانی است که نیمه پر باشند می باشد. همانطور که به نظر می رسد در برخی موارد نمیتوان رابطه ی منطقی ای بین ظرفیت کمانشی سیلوهای سالمی که تحت فشار داخلی کامل هستند با سیلوهای دارای نقصی که تحت فشار داخلی نصفه هستند پیدا نمود.



شکل ۳: بار کمانش محوری سیلوی فولادی ۵ متری به ضخامت ۱۰ میلیمتر دارای نقص خوردگی به ازای فشار داخلی نیمه یا کامل تحت بار مرکب (تحت تاثیر ۰/۳۵ از بار جانبی).



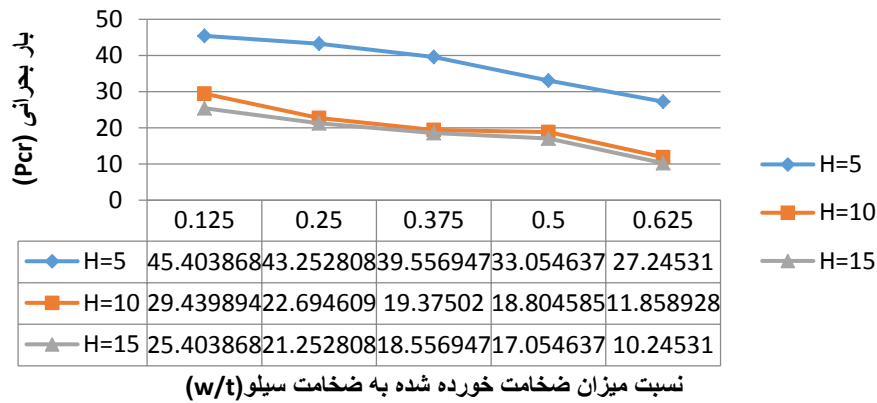
شکل ۴: بار کمانش محوری سیلوی فولادی ۱۰ متری به ضخامت ۱۲ میلیمتر دارای نقص خوردگی به ازای فشار داخلی نیمه یا کامل تحت بار مرکب (تحت تاثیر جانبی). (از بار جانبی) ۰/۶۵.



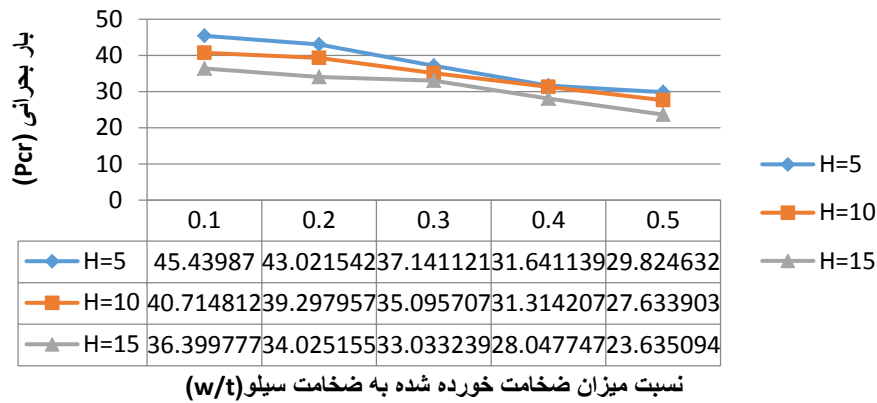
شکل ۵: بار کمانش محوری سیلوی فولادی ۱۵ متری به ضخامت ۸ میلیمتر دارای نقص خوردگی به ازای فشار داخلی نیمه یا کامل تحت بار مرکب (تحت تاثیر کل بار جانبی).

۲-۶- مقایسه نتایج نسبت به ارتفاع سیلو

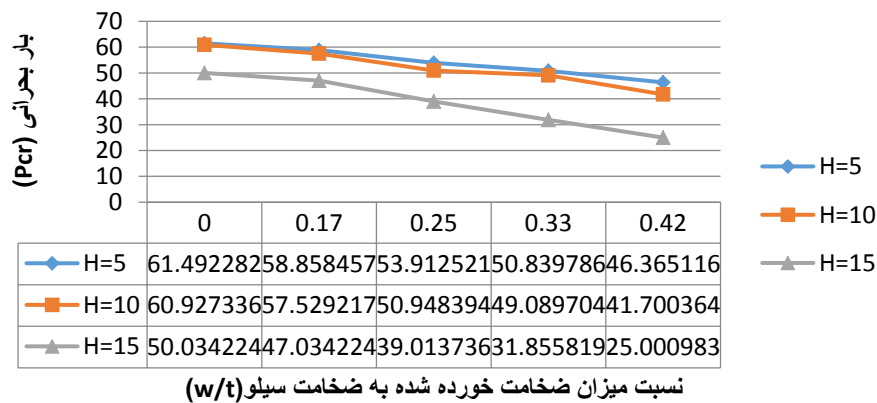
در شکل های زیر سعی بر این شده که در فشارهای داخلی مشخصی با ضخامت مشخص سیلو، تغییرات بار کمانشی در ارتفاع های مختلف سیلوهای فولادی دارای نقص خوردگی در پایین مدل ها تحت بارهای مرکب بررسی گردد. به طور مثال در شکل ۶، سیلوهای فولادی ۸ میلیمتری که نقص خوردگی در پایین آن وارد شده و در معرض فشار داخلی کامل قرار دارد و تحت اثر بار مرکب با در نظر گرفتن ۰/۳۵ از بار جانبی قرار دارد در سه ارتفاع ۵، ۱۰ و ۱۵ متری مورد مقایسه قرار گرفته شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش ارتفاع سیلوها، ظرفیت کمانشی محوری کاهش می یابد.



شکل ۶: مقایسه بار کمانش محوری سیلوی فولادی با ضخامت ۸ میلیمتر دارای نقص خوردگی در پایین سیلو و فشار داخلی کامل تحت بار مرکب (۰/۳۵ بار جانبی).



شکل ۷: مقایسه بار کمانش محوری سیلوی فولادی با ضخامت ۱۰ میلیمتر دارای نقص خوردگی در پایین سیلو و فشار داخلی کامل تحت بار مرکب (۰/۴۵ بار جانبی).

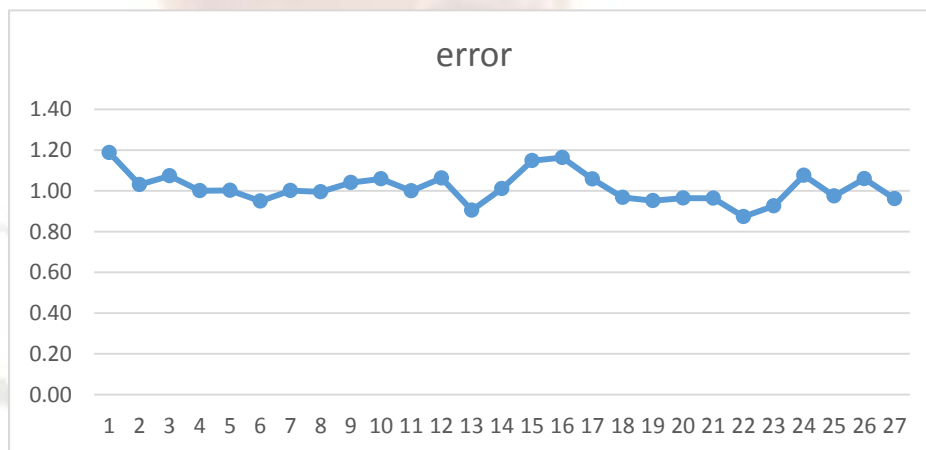


شکل ۸: مقایسه بار کمانش محوری سیلوی فولادی با ضخامت ۱۲ میلیمتر دارای نقص خوردگی در پایین سیلو و فشار داخلی نیمه تحت بار مرکب (کل بار جانبی).

۷- پیش بینی نتایج توسط شبکه عصبی بنیادی شعاعی RBF

شبکه های عصبی با معماری های مختلف مورد استفاده قرار گرفت و از بین آن ها بهترین شبکه انتخاب شد. ملاک انتخاب شبکه مناسب میزان خطای کمتر در پیش بینی می باشد. شبکه عصبی انتخاب شده دارای یک لایه پنهان است که تعداد نرون های آن برابر با تعداد پارامترهای ورودی است. تعداد ۱۳۵ نمونه برای آموزش و آزمایش شبکه عصبی بنیادی شعاعی مورد استفاده قرار گرفت. ۷۵٪ از این تعداد داده برای آموزش شبکه و مابقی برای آزمایش آن انتخاب شد. داده های انتخاب شده برای آموزش کاملا تصادفی انتخاب شدند.

پس از آموزش دیدن شبکه بنیادی شعاعی، شبکه قابلیت پیش بینی داده های جدید را دارا شده است. بر این اساس پیش بینی شبکه برای ۲۷ نمونه مختلف با ورودی های مشخص؛ نوع بارگذاری، میزان خورده شده، نسبت قطر به ضخامت سیلو و ارتفاع های سیلو محاسبه گردید. شکل ۹ نشان دهنده نسبت داده های تحلیل شده در نرم افزار ANSYS به داده های پیش بینی توسط شبکه عصبی در نرم افزار MATLAB می باشد. هر قدر نسبت مورد نظر بیشتر به عدد یک نزدیک باشد نشانگر پیش بینی دقیق تر شبکه است. بر این اساس منحنی ارائه شده در شکل ۹ نشان می دهد شبکه با خطای حدود پانزده درصد (به جز یک مورد) قابلیت پیش بینی بار کمانش سیلوه را دارا می باشد. همانگونه که در شکل مذکور مشاهده می شود، در بیشتر نمونه ها مقدار این خطا کمتر از ده درصد می باشد. این مقادیر خطا با در نظر گرفتن عدم قطعیت های بزرگ موجود کاملا قابل قبول است.



شکل ۹: نسبت بار کمانش تحلیلی به بار کمانش پیش بینی شده توسط شبکه عصبی برای سیلوه های دارای فشار داخلی کامل.

۸- خلاصه و نتیجه گیری

- در سیلوه های دارای نقص خوردگی تحت بارهای مرکب ۰/۳۵، ۰/۶۵ و ۱ می باشد، حاکی از آنند که هرچه میزان خورده شده نقص خوردگی به ضخامت افزایش پیدا می کند بار بحرانی کمانش کاهش پیدا می کند. در این سیلوه ها دیده شده است که بارهای بحرانی کمانش زمانی که سیلوه ها پر باشند بحرانی تر از زمانی است که نیمه پر باشند می باشد. همچنین دیده شد که در برخی موارد نمیتوان رابطه ای منطقی بین ظرفیت کمانشی سیلوه های سالمی که تحت فشار داخلی کامل هستند با سیلوه های دارای نقصی که تحت فشار داخلی نصفه هستند پیدا نمود.



- وجود فشار داخلی هیدرو استاتیک در پوسته ها در تمام شرایط بارگذاری موجب کاهش ظرفیت کمانش محوری پوسته ها می شود.
- خوردگی می تواند تأثیر قابل توجهی بر کمانش پوسته ها داشته باشد. تحلیل ها نشان می دهد، در شرایط ثابت هرچه میزان خورده شده به ضخامت سیلو بیشتر می شود ظرفیت کمانشی سیلو کاهش می یابد. همچنین بدیهی است که افزایش ارتفاع و کاهش ضخامت نیز سبب کاهش ظرفیت باربری سیلوها می شوند.
- شبکه عصبی بنیادی شعاعی توانایی مناسبی در پیش بینی ظرفیت کمانشی پوسته ها از خود نشان داد. آموزش شبکه به گونه ای انجام شد که حتی نمونه هایی که شبکه تجربه آنها را نداشته است نیز توسط شبکه به خوبی پیش بینی گردید و با درصد خطای حدود پانزده درصد نتیجه قابل قبول ارائه نمود.
- با توجه به اجتناب ناپذیر بودن نقص های هندسی و سیستماتیک در سیلوها باید اثر همزمان نقص های مذکور با خوردگی پوسته جداره سیلو، در محاسبات مربوط به طراحی این نوع مخازن در نظر گرفته شود تا بتوان با هرچه بیشتر نزدیک کردن نتایج عددی و تجربی، در زمان وقوع حوادث، از ایجاد خسارت های زیان بار و هزینه های ناشی از آن جلوگیری به عمل آورد.

مراجع

- [۱] Lorenz, Z. (1908). Achsensymmetrische Verzerrungen in dunnwandigen Hohlzylinder. Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure 52, 1766–1793.
- [۲] Timoshenko, S.P. (1910). Einige stabiats Probleme der Elastizitatstheorie. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Physik 58, 337–357.
- [۳] Southwell, R.V. (1914). On the general theory of elastic stability. Philosophical Transactions of the Royal Society, London, Series A 213 187–202.
- [۴] Flugge, W. (1932). Die Stabilität der Kreiszyinderschalen. Ingenieur 3, 463–506.
- [۵] Lundquist, E.E. (1933). Strength test of thin-walled duralumin cylinders in compression. NACA Technical Note, No. 473.
- [۶] Schmit H., Winterstetter Th. A., Cylindrical Shell under Combined Loading Axial Compression External Pressure and Torsional Shear, Buckling of Thin Metal Shell; pp261-285 Spon Press London.
- [۷] Schnell, W. (1959), "Zur Stabilitat dunnwandiger Langgedruckter kreiszy linderschalen bei Zusatzlichem Innendrouck", proceedings of the IUTAM Symposium on the theory of thin Elastic Shells, Delft, August; 167-188.
- [۸] Yamaki, N. (1984). Elastic Stability of Circular Cylindrical Shells. Elsevier Applied Science Publishers, North Holland, Amsterdam.
- [۹] Koiter, W.T. (1945). On the stability of elastic equilibrium. PhD Thesis, Delft University (in Dutch)
- [۱۰] Donnell, L.H. and Wan, C.C. (1950). Effect of imperfections on buckling of thin cylinders and columns under axial compression. Journal of Applied Mechanics, Transaction of the ASME 17(1), 73–83