مجله مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1394، دوره 15، شماره 9، ص‌ص 360-370

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تعیین پاسخ مکانیکی مخازن کامپوزیتی با برش دایره‌ای تحت فشارهیدرواستاتیک خارجی یکنواخت

مجید الیاسی [1*]، حسن یوسفی نژاد گیلده[2]، محمود ذبیح پور[3]

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک ، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل
3-استادیار، مهندسی مکانیک، مجتمع دانشگاهی هوافضا دانشگاه صنعتی‌مالک اشتر، تهران
* بابل، صندوق پستی 484، elyasi@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 19 خرداد 1394
پذیرش: 12 مرداد 1394
ارائه در سایت: 31 مرداد 1394

کلید واژگان:
مخازن کامپوزیتی
دریچه
تحلیل اجزای محدود
فشارخارجی
کمانش

چکیده

ایجاد دریچه در مخازن کامپوزیتی به دلیل کاربری‌های مختلف مانند لزوم دسترسی، بازرسی، نصب قطعات، محل ورود و خروج و غیره اجتناب ناپذیر است. از طرف دیگر محاسبات سازه‌ای مواد و ساختارهای کامپوزیتی به‌خودی خود با پیچیدگی‌های خاصی همراه است و اضافه کردن هرگونه نواقص یا برش‌های سازه‌ای بر این پیچیدگی‌ها به شدت می‌افزاید. هدف از این پژوهش، بررسی قرارگیری مخازن کامپوزیتی با سه دریچه دایره‌ای در فشار 30 بار است بطوری‌که هیچ‌یک از انواع واماندگی‌های پیش‌رس (قبل از شکست) مانند کمانش درآن رخ ندهد. علاوه بر آن تعیین ضخامت بهینه مخزن برای تحمل این فشار و اثر ایجاد دریچه در این پژوهش بررسی شده است. مخازن مورد بررسی از الیاف شیشه و ماتریس اپوکسی در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی پارامترها از روش اجزای محدود جهت تحلیل وضعیت‌های مختلف استفاده شده است. در تحلیل اجزای محدود، نرم‌افزار آباکوس استفاده گردید و از آنالیزهای خطی و غیر خطی جهت حل مسأله استفاده شد. جهت ارزیابی نتایج شبیه‌سازی، رفتار مکانیکی دو نمونه تست فشار خارجی مخزن تا نقطه شکست بررسی شد و نتایج آن با شبیه‌سازی مقایسه شد. همچنین مخزن نهایی با سه دریچه ساخته شد و تحت فشار خارجی 30 بار مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج بدست آمده از تحلیل‌ها نشان می‌دهد، بهترین ضخامت برای تحمل این فشار در مخزن با دریچه، 16 میلی‌متر بوده و ایجاد دریچه باعث کاهش فشار کمانش مخزن می‌گردد. همچنین با افزایش اندازه دریچه میزان درصد کاهش فشار کمانش افزایش می‌یابد.

Determination of mechanical response of composite cylinders including circular cutout subjected to uniform external hydrostatic pressure

Majid Elyasi[1*], Hassan Yousefinezhad Gildeh[1], Mahmood Zabihpoor[2]

1- Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
2- Aerospace Research Institute, Malekashtar University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 484, Babol, Iran, elyasi@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 09 June 2015
Accepted 03 August 2015
Available Online 22 August 2015

Keywords:
Composite vessels
Cutout
Finite Element Method
External Pressure
Buckling

ABSTRACT

Due to the necessity of access opening, inspection paths, installation, entrance and exit doors, etc, creation of cutouts on the vessel structure is unavoidable. On the other hand, composite structures and structural analysis are complex and creating cutout and imperfect structure increases this complexity. The aim of this research is to determine the mechanical response of three cutout positions on composite pressure vessels under 30 bar external pressure, so that no buckling and fracture failure occurs. Also, the optimum composite vessel thickness for this condition and cutout effect has been determined in this study. The studied vessels are made from E-Glass fiber and Epoxy matrix. Finite element simulation was used to investigate the parameters effect. For this reason, commercial ABAQUS software and linear and non-linear analysis was carried out to examine the parameters. To evaluate the simulation results, two composite vessels were manufactured and fractured under external pressure. Moreover, the final vessel with three cutouts was tested under 30 bar external pressure. The concluded results show that the optimum thickness was 16 mm for vessel with three cutouts and creating the cutouts led to decreased buckling pressure. Also, with increasing cutout size the percentage of buckling pressure increased.

1- مقدمه

مواد کامپوزیتی نقش بسیار مهمی در بهینه‌سازی‌های مهندسی ایفا می‌کنند. وزن پایین و مقاومت بالا بیشترین مزیت استفاده از این مواد در کاربردهای مختلف می‌باشد. امروزه مواد کامپوزیتی کاربرد بسیار زیادی در سازه‌های سبک و مدرن پیدا کرده‌اند و به دلیل مقاومت در برابر ضربه و خوردگی، به‌طور گسترده در صنایع مختلف کاربرد گوناگون دارند. مخازن کامپوزیتی، که بیشتر درصنایع هوافضا، دریایی و خطوط انتقال سیال کاربرد دارند با توجه به نوع کاربرد و نحوه بارگذاری، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. برای شناخت هر چه بیشتر مواد و پیش‌بینی رفتار مکانیکی در مخازن کامپوزیتی، در عمل باید شناخت رفتارسازه‌ای به ویژه اثر نقص‌های هندسی اجتناب

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
M. Elyasi, H. Yousefinezhad Gildeh, M. Zabihpoor, Determination of mechanical response of composite cylinders including circular cutout subjected to uniform external hydrostatic pressure, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 360-370, 2015 (In Persian)

ناپذیر مانند دریچه‌ها، در آن‌ها مورد مطالعه قرارگیرند [1].

اثر نقص‌های هندسی اجتناب ناپذیر مانند دریچه در مخازن تحت فشار کامپوزیتی بر انتخاب مواد، پیش‌بینی رفتار مکانیکی و رفتار سازه‌ای آن‌ها تأثیرگذار است. بر اساس شرایط کاری مخازن تحت فشار، ایجاد دریچه بر روی آن‌ها جهت بازرسی، نصب قطعات، ورود و خروج و داده برداری ضروری می‌باشد. از طرفی، ایجاد دریچه باعث تغییر شدید میدان تنش در اطراف آن و در صورت بارگذاری فشاری، باعث تغییر رفتار کمانشی مخازن خواهد شد. به عبارت دیگر ایجاد دریچه در مخازن تحت فشار کامپوزیتی باعث می‌شود که آن‌ها تحت بارکمتری نسبت به ظرفیت و بار مجاز دچار ناپایداری گردند. بنابراین بررسی رفتار کمانشی و ویژگی‌های شکست مواد و مخزن بر اثر ایجاد دریچه، به درستی پیش‌بینی، طراحی ایمن و افزایش بازده در مخازن تحت فشار کامپوزیتی کمک می‌نماید [2].

با وجود آنکه تأثیرات در نظرگرفتن حضور دریچه‌ها در یک مخزن مشخص با درنظر گرفتن ضرایب اطمینان بالاتر در طراحی قابل جبران است، اما این مسأله به شدت دستیابی به آن مخزن را با شرایط بهینه‌ای مانند حداقل وزن در کنار حداکثر استحکام یا مقاومت را تهدید می‌نماید. به دلیل کاربرد فراوان کامپوزیت‌ها، مطالعات زیادی پیرامون خواص مکانیکی این سازه‌ها انجام شده است. از طرفی بررسی بارهای اعمالی به سازه‌های کامپوزیتی و دریچه‌های ایجاد شده در این سازه‌ها به دلیل ارتباط مستقیم با خواص مکانیکی همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است [3].

جین مون و همکارانش [4] کمانش مخازن کامپوزیتی جدار ضخیم ساخته شده به روش رشته پیچی تحت فشارهیدرو استاتیک خارجی و نیروی محوری را برای کاربردهای زیر آبی با استفاده از روش اجزای محدود و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. همچنین آن‌ها اثر زاویه‌های مختلف رشته پیچی را بر بار کمانشی بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که پوسته استوانه‌ای رشته پیچی شده با زاویه [±60/90] در برابر فشار هیدرواستاتیک خارجی تغییر شکل‌های محوری و جانبی بیشتری دارد که بیانگر مقاومت پوسته در برابر فشار بحرانی کمانش می‌باشد. همچنین آنها نشان دادند که کمانش پوسته‌های استوانه‌ای به تغییرات جابجایی وابسته است که این تغییرات وابسته به زاویه الیاف بوده و لایه‌های رشته پیچی شده با زاویه 60 درجه نسبت به 45 و 30 درجه جابجایی بیشتری دارد و در نتیجه در برابر فشار خارجی، مقاومت بیشتری دارد.

هور و همکارنش [5] در پژوهشی رفتار پس‌کمانش و شکست لوله‌های کامپوزیتی تحت فشاری خارجی را با استفاده از روش تئوری و تجربی بررسی کردند. این محققان برای تحلیل شکست مخزن کامپوزیتی با استفاده از روش اجزای محدود از روش غیرخطی و برای کار تجربی خود از پنج نمونه مخزن با استفاده از تست کرنش‌سنج بهره گرفتند. بدین‌گونه که از چهار کرنش‌سنج در جهت طولی و چهار کرنش‌سنج در جهت محیطی برای بهره-گیری از داده‌های کرنشی استفاده کردند.

تفرشی [6] لایه‌شدگی در اثر کمانش و پس‌کمانش سیلندرهای کامپوزیتی تحت فشار خارجی را بررسی کرد. او برای پیش‌بینی لایه‌شدگی کمانش و پس‌کمانش در این سازه‌ها از روش اجزای محدود سه بعدی استفاده کرد. سیلندرها ازجنس گرافیت- اپوکسی و دارای شرایط مرزی دو انتها تکیه‌گاه ساده در نظر گرفته شد. نتایج ارایه شده در این پژوهش بصورت ارتفاع و پهنای لایه شدگی بیان گردید و نشان داده شد که با افزایش ارتفاع لایه‌شدگی فشار کمانش کاهش می‌یابد و همچنین با کاهش پهنای لایه‌شدگی بار بحرانی افزایش می‌یابد.

تفرشی در پژوهشی دیگر [7] رفتار کمانشی و پس‌کمانشی مخازن کامپوزیتی دارای دریچه مربعی را تحت فشار داخلی و فشار محوری با استفاده از روش اجزای محدود مورد بررسی قرار داد. او برای بررسی صحت کارخود، نتایج مربوط به بارکمانشی را با حاصل از کار دیگران مقایسه کرد. به‌علاوه، این محقق با استفاده از روش اجزای محدود اثر اندازه دریچه را برروی بارکمانشی ارایه کرد. نتایج این تحقیقات نشان داد که با افزایش فشار داخلی و محوری بار کمانشی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش اندازه دریچه بار کمانشی کاهش می‌یابد.

اللهبخش و شریعتی [8] در مطالعه‌ای به تحلیل ترک کمانشی مخازن کامپوزیتی تحت بارگذاری ترکیب شده پرداختند. آن‌ها در تحقیق خود به بررسی اثر شرایط بارگذاری و اندازه ترک را بر روی رفتار کمانشی مخازن کامپوزیتی تحت بارگذاری مختلف مانند بارگذاری فشاری محوری، خمیدگی، فشارداخلی و خارجی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد، کاهش بار فشاری محوری و افزایش فشار خارجی برروی کمانش تمام مودها مؤثر است و افزایش بار فشاری محوری و کاهش فشار خارجی بر روی کمانش مودهای موضعی مؤثر می‌باشند.

فیلیپ و پرابها [9] در پژوهشی به بررسی عددی سفتی مخازن کامپوزیتی تحت فشارخارجی با استفاده ازروش اجزای محدود پرداختند. این محققان اثر موضعی تقویت کننده و اثر بی‌نظمی تقویت کننده را بر روی مقاومت پوسته‌ها بررسی کرده و برای دریافت پاسخ پوسته‌های کامپوزیتی این بررسی را برای ضخامت‌های مختلف پوسته انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش ضخامت پوسته بار کمانشی افزایش می‌یابد. همچنین بیان کردند که ترتیب توالی لایه‌چینی 0/90/0/90/0/90/0/90/0 دارای بالاترین ظرفیت بارکمانشی در کار آن‌ها می‌باشد.

شی و همکارانش [10] پاسخ کمانش و پس‌کمانش مخازن کامپوزیتی شبکه‌بندی شده با دریچه مربعی و دایره‌ای تقویت شده تحت بار محوری را مطالعه کردند. آن‌ها در این مطالعه اثر دو نوع تقویت کننده پوسته‌ای و شبکه‌بندی شده در پیکربندی‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد تقویت کننده با پیکر بندی شش ضلعی بدون پشت بند به دلیل ترکیب بهتر هندسه دارای سطح انتقال بار بالاتری نسبت به سایر پیکربندی‌ها می‌باشد. همچنین نشان دادند که تقویت کننده از نوع شبکه‌بندی دارای بار فروپاشی پایین‌تری نسبت به نوع تقویت کننده پوسته‌ای است.

لیو و همکارانش [11] تحلیل شکست سیلندرهای کامپوزیتی کربن-اپوکسی را با استفاده از روش اجزای محدود بررسی کردند. آن‌ها همچنین نتایجی از تأثیر اندازه شبکه و زمان محاسبه بر روی شکست مواد ورقه‌های کامپوزیتی ارایه دادند. این محققان از شبکه‌بندی و زمان محاسبه مختلف استفاده نمودند و از تئوری شکست هاشین برای کار خود استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که تعداد المان فشار شکست افزایش می‌یابد و تعداد المان بهینه را ارائه دادند. همچنین نشان دادند که با افزایش زمان محاسبه در فشار برابر، کرنش افزایش می‌یابد.

دارسینی و همکارانش [12] در یک مطالعه عددی با استفاده از روش اجزای محدود و بصورت پارامتری و تجربی کمانش مخازن کامپوزیتی تقویت شده با پلاستیک تحت فشار محوری بررسی کردند. این محققان، اثر توالی لایه‌چینی مختلف و تغییرات نقص هندسی اولیه مخزن را بر بار کمانشی بررسی کردند. همچنین تغییر شکل محوری را مورد بررسی قرار دادند. نتایج

تحقیقات آن‌ها نشان داد با افزایش مقدار نقص اولیه هندسی بار کمانشی کاهش و تغییر شکل محوری افزایش می‌یابد.

کیم هون و همکارانش [13] در یک پژوهش تجربی و عددی کمانش سیلندرهای کامپوزیتی جدار ضخیم را تحت فشار خارجی مورد بررسی قرار دادند. آن محققان برای پیش‌بینی کمانش سیلندرهای کامپوزیتی از روش اجزای محدود استفاده کردند و دو روش، خواص معادل و ترتیب انباشت را برای تحلیل کمانش مخازن ساخته شده به روش رشته پیچی پیشنهاد کردند. مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی این پژوهش نشان داد که تطابق خوبی بین تحلیل عددی و کار تجربی برقرار است و مقدار خطای بین 1 تا 5 درصد میان نتایج وجود دارد.

چایی و همکارانش [14] تحلیل کمانش لوله‌های کامپوزیتی با طول بلند تحت فشار خارجی را به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن محققان 20 نمونه از لوله کامپوزیتی به طول 55 سانتی‌متر را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که وقتی کمانش و فروپاشی رخ می‌دهد فشار به‌شدت کاهش می‌یابد و همچنین آن‌ها در این کار خود تفاوت بین فشار کمانش و فشار فروپاشی را پیدا کردند و نشان دادند که فروپاشی لوله‌های طویل بلافاصله پس از کمانش رخ می‌دهد.

فرولونی و همکارانش [15] در یک مطالعه تجربی و عددی به بررسی ناپایداری الاستیک مخازن کامپوزیتی شبکه‌بندی شده تحت فشار خارجی پرداختند. آن محققان مطالعه عددی خود را با استفاده از روش اجزای محدود و به دو صورت خطی و غیر خطی بررسی کردند. سپس نتایج کمانش خطی و غیرخطی را برای یک طول نمونه 195mm ارائه دادند. همچنین آن‌ها نشان دادند که تحلیل غیرخطی نتایج قابل قبول‌تری را برای پیش‌بینی بار کمانشی ارائه می‌دهد.

هیلبرگر [16] کمانش و شکست مخازن کامپوزیتی دارای دریچه تحت فشار محوری را به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار داد. این محقق برای مطالعه خود از کرنش‌سنج درجهت محوری برای بدست آوردن نتایج تجربی استفاده کرد. نتایج این تحقیقات نشان داد که بار کمانشی مخزن در حالت با دریچه نسبت به مخزن بدون دریچه به میزان 37 درصد کاهش یافته است.

دی و همکارانش [17] تحلیل کمانش و پس‌کمانش پوسته‌های استوانه-ای کامپوزیتی مورد استفاده برای کاربردهای زیرآبی را با استفاده از روش اجزای محدود بررسی کردند. در این پژوهش، سه نوع مخزن با ترتیب لایه-گذاری‌های مختلف و با طول، قطر و ضخامت یکسان بررسی شد. هدف اصلی این پژوهش، اثر ترتیب لایه گذاری بر بار کمانشی بود. همچنین به هر مخزن، 10 مگاپاسکال فشار هیدرواستاتیک معادل عمق 1000 متر اعمال گردید و پاسخ کمانشی مخازن بررسی شد. نتایج این تحقیقات نشان داد ترتیب لایه‌گذاری [±60/90] دارای بالاترین مقدار فشارکمانشی و ترتیب لایه‌گذاری [±30/90] دارای کمترین فشار کمانشی است.

گاوین دارج و همکارانش [18] در یک مطالعه عددی با استفاده از روش اجزای محدود به مقایسه مخازن کامپوزیتی و فلزی برای کاربردهای زیرآبی در عمق 1000 متر پرداختند. آن محققان برای بررسی اثر جنس مخزن، از دو نوع مخزن کامپوزیتی کربن- اپوکسی و شیشه- اپوکسی و سه نوع مخزن فلزی از جنس آلومینیوم، تیتانیوم و فولاد استفاده کردند. نتایج این تحقیقات نشان داد بهترین مخزن از لحاظ وزن برای تحمل فشار 10 مگاپاسکال مخزن کربن- اپوکسی و کمترین ضخامت برای تحمل این فشار مربوط به مخزن از جنس فولاد می‌باشد. همچنین آن‌ها در نتایج خود نشان دادند که مخزن کربن- اپوکسی 46 درصد و مخزن شیشه- اپوکسی 31 درصد سبک‌تر از مخزن فولادی برای تحمل فشار 10 مگاپاسکال می‌باشد.

هان‌کیم و همکارانش [19] تحلیل کمانش سیلندرهای کامپوزیتی جدار ضخیم ساخته شده به روش رشته-پیچی را تحت فشار هیدرواستاتیک خارجی بصورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از سیلندرهای کامپوزیتی از جنس کربن – اپوکسی با طول 695 میلی‌متر و شعاع 150میلی-متر و ضخامت 8 میلی‌متر و ترتیب لایه‌گذاری [±30/90] استفاده کردند. همچنین از دو نوع المان پوسته‌ای و حجمی برای بررسی نتایج خود استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که اختلاف 1 تا 5 درصدی بین نتایج عددی و نتایج تجربی وجود دارد و همچنین اختلاف اندکی بین بارکمانشی خطی دو نوع المان وجود دارد.

با بررسی‌های انجام شده مشاهده شد که تاکنون بیشتر مطالعات انجام شده در زمینه اثر ایجاد دریچه بر روی کمانش صفحات کامپوزیتی است. اکثر پژوهش‌های انجام شده در زمینه مخازن کامپوزیتی تحت فشار نیز در حالت بدون دریچه بررسی شده است و تحقیقات اندکی در ارتباط با اثر ایجاد دریچه در کمانش مخازن کامپوزیتی تحت فشار خارجی انجام گرفته است.

نظر به اهمیت بسیار بالای این نوع بارگذاری بر اساس محصولات تحت فشار خارجی، نگارندگان این مقاله در پژوهشی دیگر [20] مطالعه پارامتری رفتار کمانش مخازن کامپوزیتی تحت فشار خارجی با دریچه دایره‌ای را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش قطر دریچه از 10 تا 30سانتی‌متر، بارکمانشی به میزان 11 درصد کاهش می‌یابد و همچنین با افزایش قطر مخزن، بار کمانشی به‌شدت کاهش می‌یابد.

هدف از این پژوهش، بررسی قرارگیری دریچه در یک مخزن کامپوزیتی صنعتی است، به‌گونه‌ای که هیچ‌یک از انواع واماندگی‌های پیش‌رس (قبل از شکست) مانند کمانش در فشار خارجی 30 بار رخ ندهد. بدین منظور با توجه به شرایط و قیود طراحی این مخزن، برای تایید نتایج شبیه‌سازی و بررسی صحت پیش‌بینی آنالیز اجزای محدود، در ابتدا رفتار شکست دو نمونه لوله تحت فشار خارجی، تا نقطه فشار شکست مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به نتایج به دست آمده و تایید نتایج شبیه‌سازی، طراحی‌های لازم برای مخزن نهایی صورت پذیرفت.

2- تحلیل اجزای محدود

جهت بررسی رفتار کمانشی مخزن و تأثیر تحلیل اندازه و موقعیت دریچه، از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده گردید. با توجه به هدف از پیش تعیین شده در این پژوهش، پیش از ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، از روش شبیه‌سازی اجزای محدود برای پیش‌بینی بارکمانشی مخازن در حالت بدون و با دریچه استفاده شد. در واقع هدف تحلیل اجزای محدود، تعیین بهترین ضخامت و همچنین پیش‌بینی اثر دریچه برای تحمل فشار 30 بار مخزن بدون کوچکترین تغییر شکل بود. البته با توجه به اختلاف غیر قابل اجتناب نتایج بار کمانشی در حالت شبیه‌سازی و تجربی، جهت به دست آوردن بهترین ضخامت مخزن، از ضریب اطمینان 1/1 در حالت شبیه‌سازی نسبت به حالت تجربی استفاده گردید.

2-1- هندسه قطعه و خصوصیات مواد

کامپوزیت مورد استفاده در این پژوهش، دارای الیاف تقویت‌کننده از نوع شیشه و همچنین ماتریس از نوع اپوکسی بود.

خصوصیات مکانیکی کامپوزیت شیشه- اپوکسی مورد استفاده در این پژوهش در جدول1 ارایه شده است. از تست کشش و فشار در جهت‌های مختلف برای تعیین خصوصیات مکانیکی ماده استفاده شد. از استانداردهای ASTM D3039 و ASTM D3410 جهت تهیه ابعاد نمونه‌های مورد آزمایش کشش و فشار استفاده گردید. به منظور اطمینان از نتیجه آزمایش، 3 تا 5 نمونه تست کشش یا فشار ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت که تصاویر برخی از نمونه‌های استفاده شده در شکل 1 نشان داده شده است. مجموعه تست کشش و فشار مورد استفاده، در شکل2 نشان داده شده است.

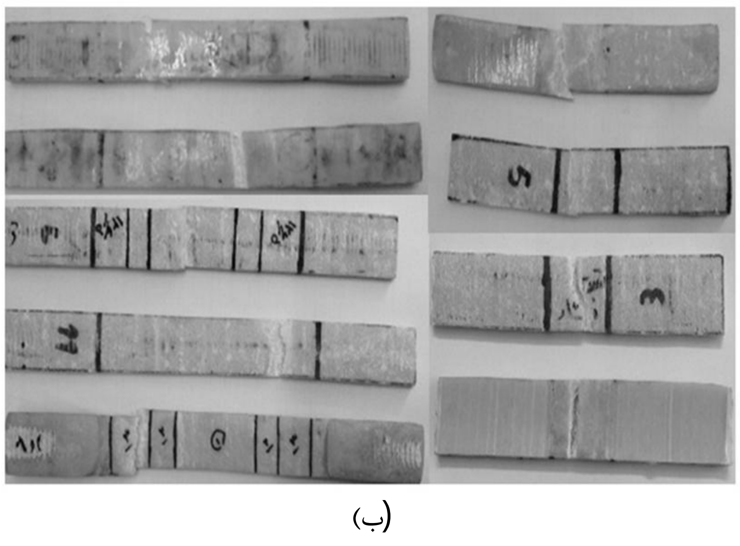
همچنین به منظور تعیین جرم الیاف و ماتریس تعداد 5 نمونه بر مبنای استاندارد ASTM D2734 از محصول نهایی جدا گردید و به مدت 8 ساعت در کوره در دمای 250 درجه سانتی‌گراد قرار داده شد تا تمامی رزین موجود در نمونه از بین رود و الیاف به‌تنهایی باقی بماند. در نتیجه با وزن کردن نمونه‌ها بعد و قبل از سوختن، میزان درصد وزنی کاهش یافته مشخص گردید. در نهایت با استفاده از رابطه (1) درصد حجمی الیاف مشخص گردید [21] و بر اساس محاسبات، درصد حجمی الیاف برابر با 55 درصد به دست آمد. تصویر سوخته شده نمونه و الیاف باقی مانده در شکل 3 نشان داده شده است.

$$V_f = \frac{W_f\,\rho_m}{W_f\,\rho_m + W_m\rho_f} \qquad (1)$$

جدول1 مشخصات مکانیکی ماده مرکب

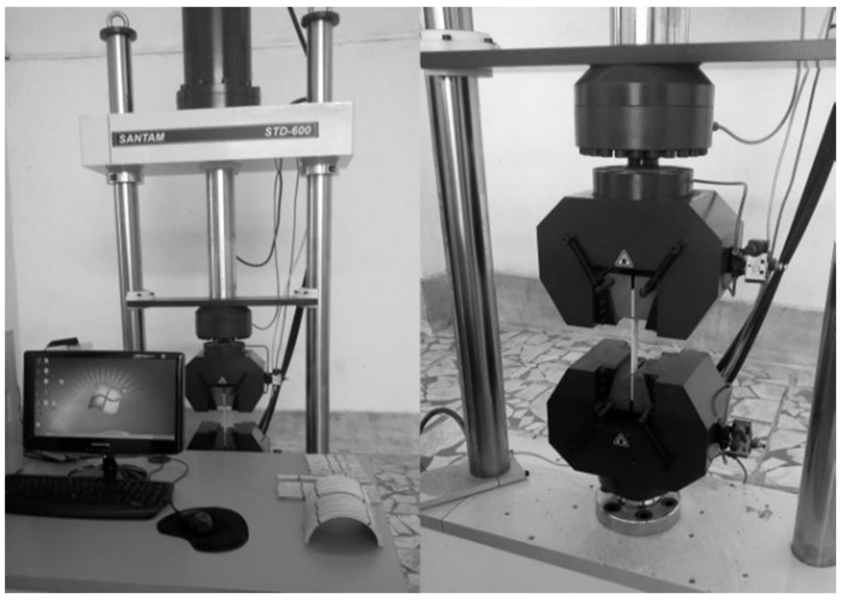
علامت (واحد)	مقدار	علامت (واحد)	مقدار
$\sigma_1{}^T$(MPa)	400	E_{11} (GPa)	30
$\sigma_1{}^C$(MPa)	180	E_{22}(GPa)	8
$\sigma_2{}^T$(MPa)	50	E_{33}(GPa)	8
$\sigma_2{}^C$(MPa)	115	ν_{12}	0/27
τ (MPa)	30	G_{12} (GPa)	4

(الف)

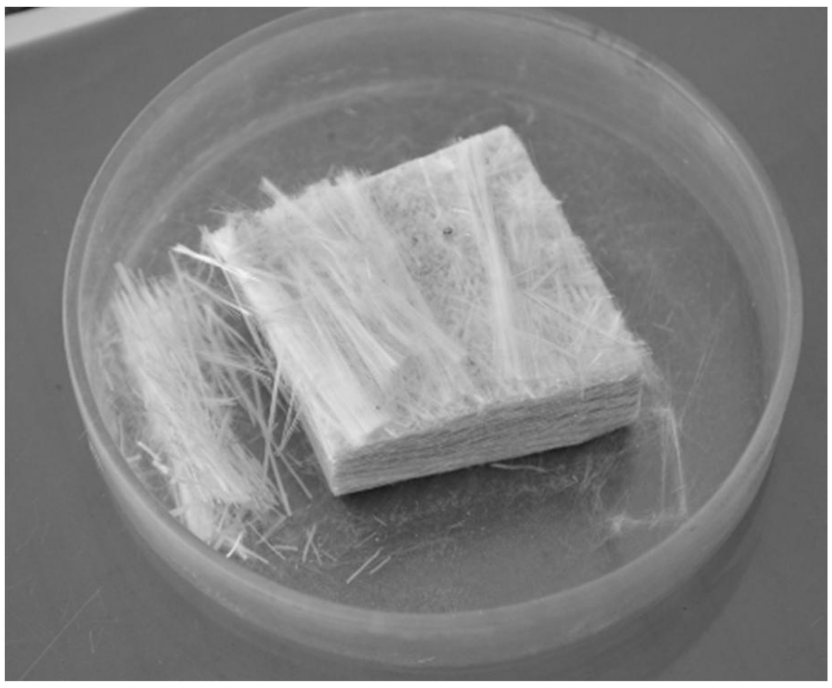


(ب)

شکل1 نمونه‌های تست کشش و فشار، الف- پیش از شکست، ب- پس از شکست



شکل2 دستگاه تست انیورسال آزمایشات تعیین خواص ماده



شکل3 نمونه حاوی الیاف بعد از تست سوزاندن

2-2- تعریف شرایط مرزی

با توجه به اینکه در انجام تست فشار خارجی، مطابق شکل 4 یک انتهای مخزن مقید شده بود. بنابراین در شبیه‌سازی نیز دوعدد فلنج فولادی به عنوان درپوش در دو طرف مخزن قرار داده شد و شرایط مرزی بدین صورت در نرم‌افزار تعیین گردید که یک انتهای مخزن به‌طورکامل مقید گردید و طرف دیگر آن هیچ گونه قیدی قرار داده نشد.

2-3- نحوه بارگذاری و شبکه بندی مدل

جهت تحلیل رفتار کمانشی مخزن مقدار جابجایی محوری بر اثر فشار خارجی اعمالی در تحلیل اجزای محدود به‌صورت یکطرفه بوده و مسیر فشار استفاده شده به صورت خطی در نرم‌افزار تعریف گردید.

مدل شبکه بندی شده مخزن درشکل 5 نشان داده شده است. باتوجه به تأثیر ریز یا درشت بودن اندازه المان و تأثیر آن در فشار کمانش، ابتدا تعداد بهینه المان به‌دست آمد. درنتیجه، تعداد 8920 المان برای مدل‌سازی اجزای محدود یک مخزن بدون دریچه استفاده شد. همچنین با توجه به کوچکتر بودن اندازه المان در نزدیکی دریچه‌ها، تعداد 11154 المان برای مخزن با دریچه در نظر گرفته شد.

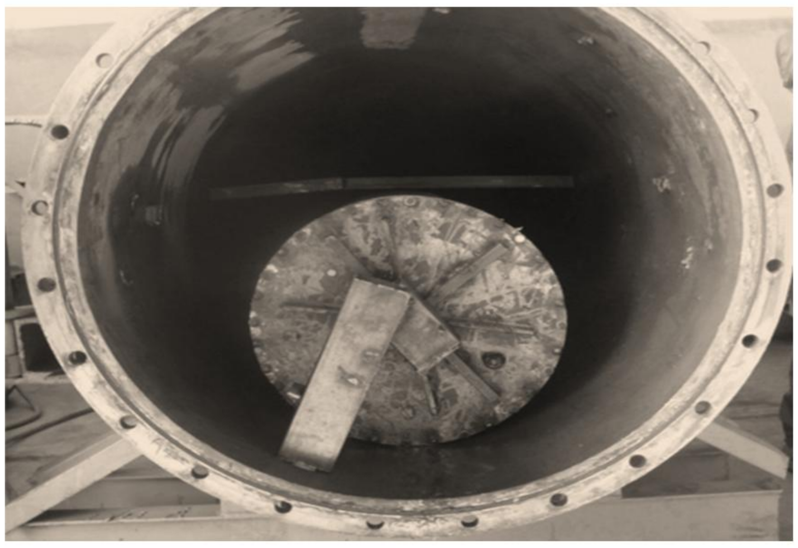
تعداد المان بر اساس حساسیت تحلیل در نظر گرفته شد. شکل 6 حساسیت تحلیل را نشان می‌دهد. این حساسیت برای مخزن به طول 1/5 متر، قطر0/5 متر و ضخامت 16 میلی‌متر در نظر گرفته شد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با کاهش تعداد المان، فشار کمانشی افزایش و با

افزایش تعداد المان فشار کمانشی کاهش می‌یابد. این تغییرات تا جایی در نظر گرفته شد که افزایش تعداد المان تأثیر چندانی در فشار کمانش نداشته باشد. به عبارت دیگر، تعداد المان به‌گونه‌ای در نظر گرفته شد که سازه استقلال از شبکه‌بندی داشته باشد و این تعداد المان که در آن فشار کمانشی تغییر آنچنانی نداشت بعنوان تعداد المان بهینه در نظر گرفته شد.

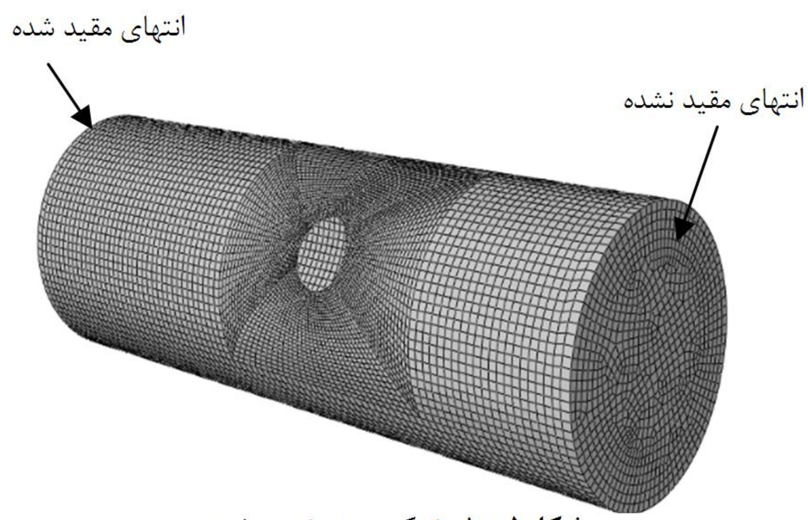
۲-۴- تحلیل کمانش

یک پوسته می‌تواند مقدار زیادی از انرژی کرنشی را بدون تغییر شکل بیش از حد جذب کند. این مقدار تغییر شکل باید خیلی بیشتر از مقدار معادل انرژی کرنشی خمشی باشد. اگر پوسته به‌گونه‌ای بارگذاری شود که بیشترین انرژی کرنشی آن به‌صورت غشا فشرده‌سازی باشد، این انرژی غشایی ذخیره شده به انرژی خمشی تبدیل گشته و ممکن است پوسته به‌طور چشم‌گیری سریع‌تر از حالت عادی شکسته شود که این پروسه کمانش نامیده می‌شود. درنتیجه وقتی یک پوسته تحت فشار قرار می‌گیرد برای یافتن ناپایداری سازه باید تحلیل کمانش آن بررسی گردد.

تحلیل کمانش به دو صورت خطی و غیرخطی بررسی می‌گردد. تحلیل خطی برای یافتن مدهای کمانشی و مقدار ویژه استفاده می‌شود. همچنین تحلیل غیرخطی برای یافتن نتایجی مانند نمودار نیرو- جابه‌جایی، بار فروپاشی و از همه مهم‌تر رفتار سازه پس از کمانش به‌کار گرفته می‌شود. در این پژوهش نیز از تحلیل‌های خطی و غیر خطی کمانش جهت بررسی وقوع کمانش و ارزیابی مقادیر آن استفاده شد. جهت تحلیل خطی از حالت کمانش[1] نرم‌افزار و برای تحلیل غیرخطی از حالت استاتیک غیر خطی[2] نرم‌افزار استفاده گردید.

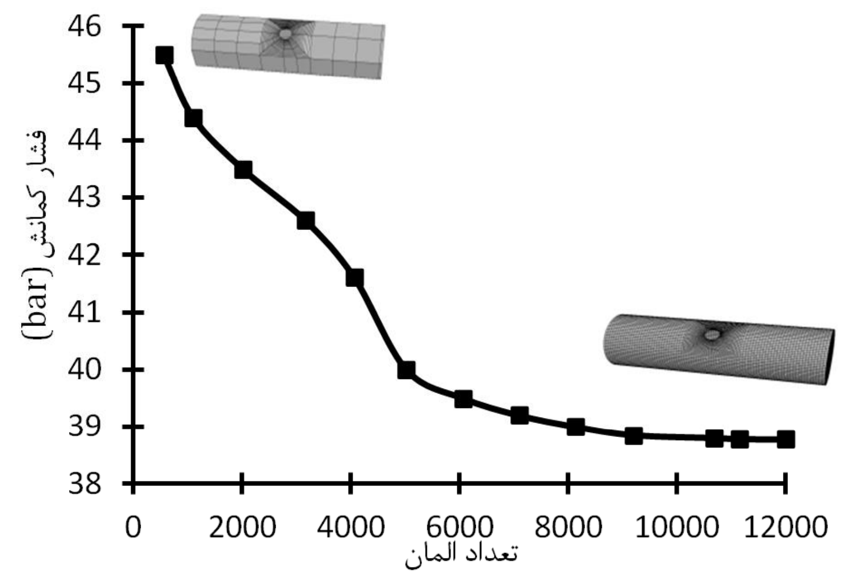


شکل۴ شرایط مرزی اعمال شده بر مخزن در حالت تجربی



شکل۵ مدل شبکه بندی شده مخزن

1- Buckling
2- Static Riks



شکل۶ تحلیل حساسیت همگرایی شبکه بندی

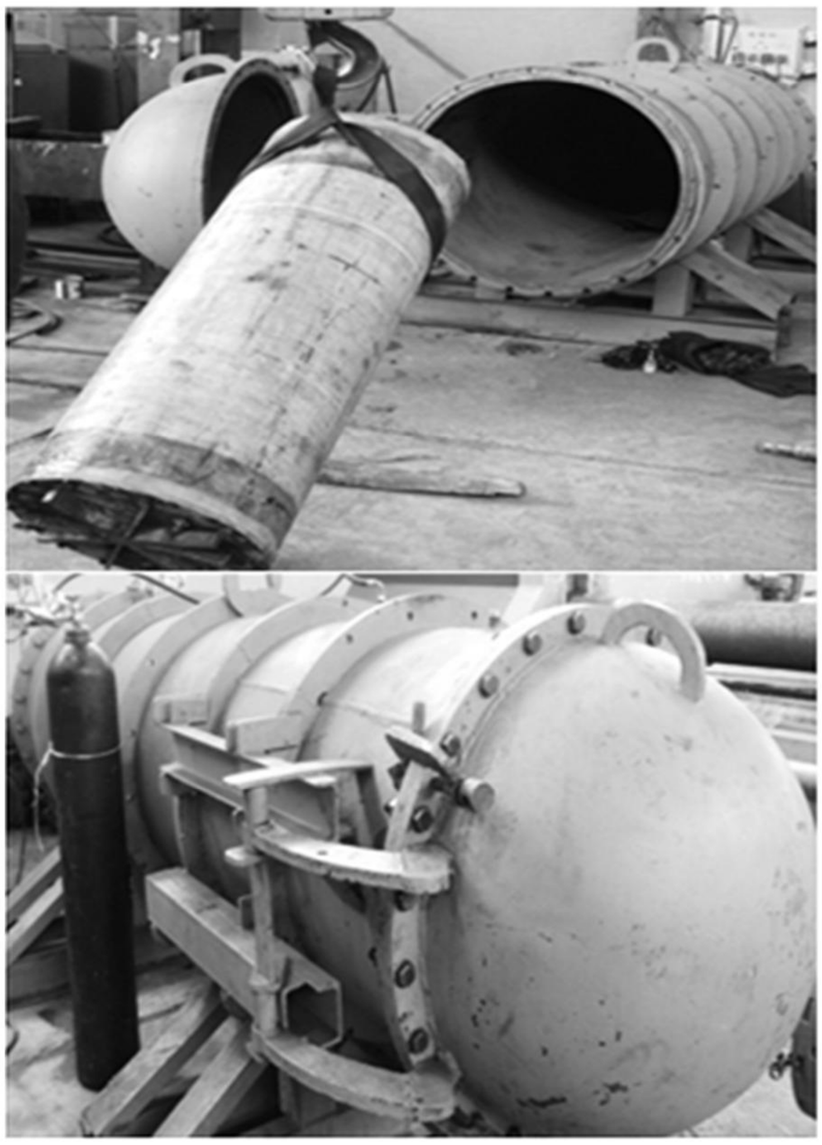
۳- مراحل آزمایشگاهی

۳-۱- ساخت مخزن کامپوزیتی

پس از طراحی مخزن و رعایت برخی از الزامات طراحی نظیر طول و قطر، مخزن به روش رشته پیچی ساخته شد. خصوصیات مواد مورد استفاده (رزین و الیاف) در ساخت مخزن در جدول ۱ بیان شده است.

۳-۲- مجموعه تست

درشکل ۷ مجموعه تست فشار خارجی استفاده شده در این پژوهش نشان داده شده است. این مخزن تست فلزی، توانایی تحمل فشار ۵۰ بار را داشت. همچنین طول و قطر این مخزن به ترتیب ۴۲۰ سانتی‌متر و ۱۰۰ سانتی‌متر بود و از دو درب نیم‌کروی فولادی جهت آب‌بندی آن استفاده شده بود. تمامی آزمایش‌ها در این مجموعه تست به صورت تست‌های فشار خارجی هیدرواستاتیک انجام شد.



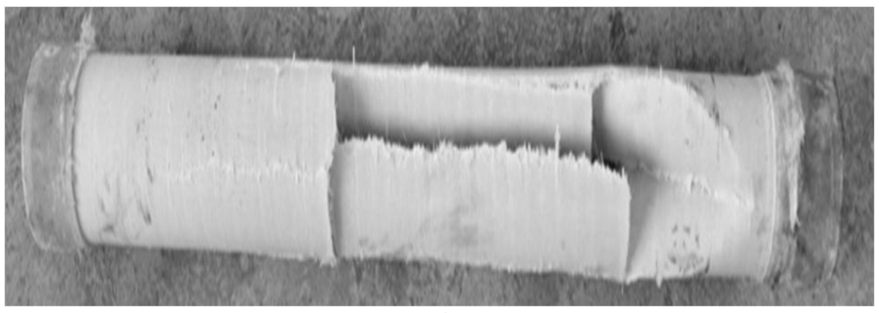
شکل۷ مجموعه تست فشار خارجی

4- نتایج وبحث

4-1- نتایج آزمایش تجربی و شبیه‌سازی مقاومت مخزن کامپوزیتی

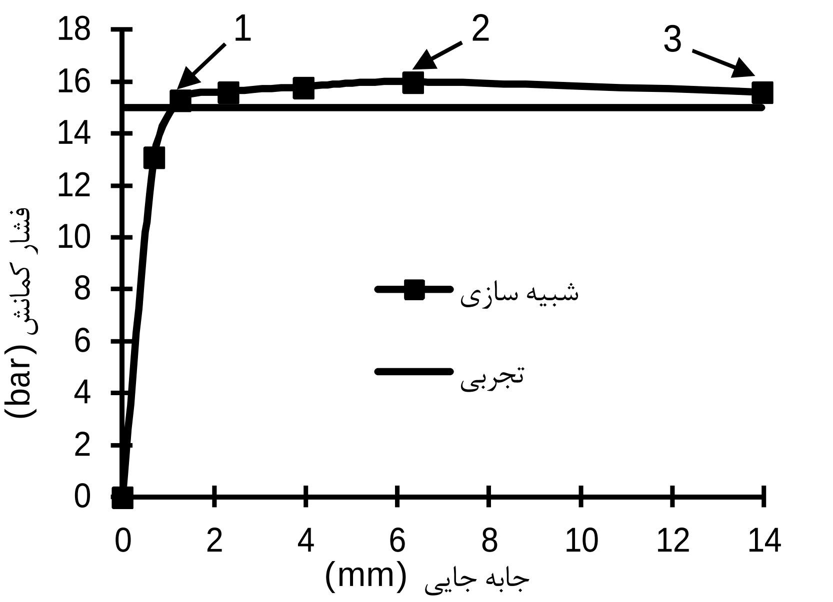
جهت صحت سنجی نتایج شبیه‌سازی، ابتدا آزمایش تخریب دو نمونه مخزن کامپوزیتی به صورت مقیاسی از مخزن اصلی، تحت فشار خارجی و بر اساس استاندارد ASTM D2924 انجام شد و نتایج آن با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقایسه گردید. تصویر مخزن شکسته شده در این آزمایش‌ها در شکل 8 نشان داده شده است. ابعاد مخزن‌های مورد آزمایش به طول 1/5متر، قطر 15 سانتی‌متر و ضخامت 4 میلی‌متر بود. شکل 9 مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی به دست آمده را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل دیده می‌شود مخزن کامپوزیتی در حالت آزمایشگاهی در فشار 15 بار و در حالت شبیه‌سازی در فشار 15/62 بار دچار شکست گردید. با مقایسه این نتایج می‌توان دریافت که تطابق خوبی بین حالت آزمایشگاهی و حالت شبیه‌سازی وجود دارد و حدود 4% اختلاف بین نتایج وجود دارد. با توجه به این شکل نقطه 1، نقطه شروع کمانش متقارن می‌باشد. به طوریکه مخزن تا جابه‌جایی 1/2میلی‌متر را بدون تغییر شکل تحمل کرده و پس از آن شروع به تغییر شکل کرده است. همچنین نقطه 2 بیانگر شروع کمانش غیر متقارن است زیرا سازه در یک الگوی غیرمشخص در جابه‌جایی 6/32 میلی‌متر شروع به تغییر شکل کرده است. در نهایت در نقطه 3، شکست در نمونه رخ داده است. این مطلب به این معنی است که مخزن در این نقطه از لحاظ استاتیکی ناپایدار شده است. به عبارت دیگر، از این شکل می‌توان دریافت که مخزن در ابتدا کمانش کرده و در نهایت به شکست رسیده است.

(الف)



(ب)

شکل 8 شکست نمونه‌ها پس از انجام آزمایش فشارخارجی



شکل 9 نمودار نیرو- جابه‌جایی در حالت تجربی و شبیه‌سازی

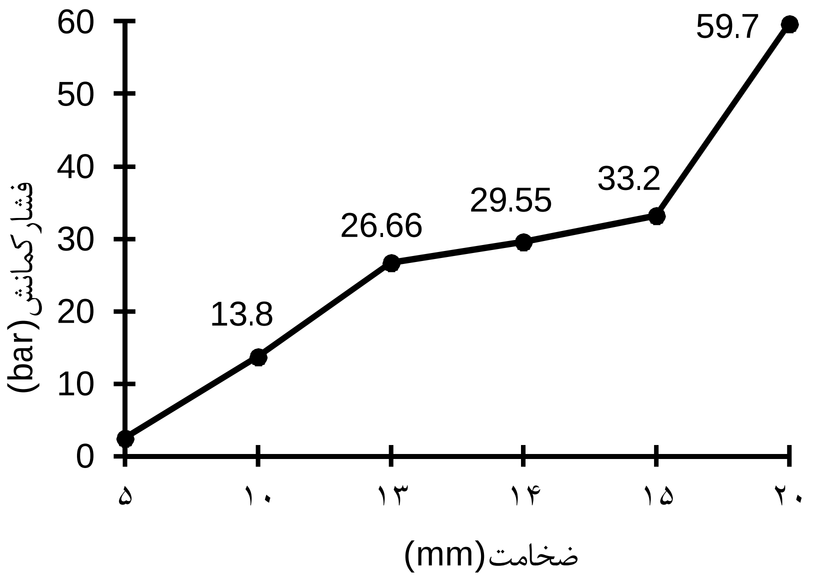
4-2- نتایج طراحی مخزن کامپوزیتی

با توجه به صحت‌سنجی صورت گرفته و پیش‌بینی درست رفتار کمانشی در مخزن‌های کامپوزیتی مقیاس شده نسبت به مخزن اصلی، برای بررسی مقاومت مخزن اصلی نسبت به کمانش در فشار خارجی 30 بار، ابتدا شبیه‌سازی مخزن اصلی بدون دریچه با تحلیل کمانش خطی انجام گردید. نتایج به دست آمده از تحلیل کمانش خطی بر اساس ضخامت‌های مختلف در شکل 10 نشان داده شده است.

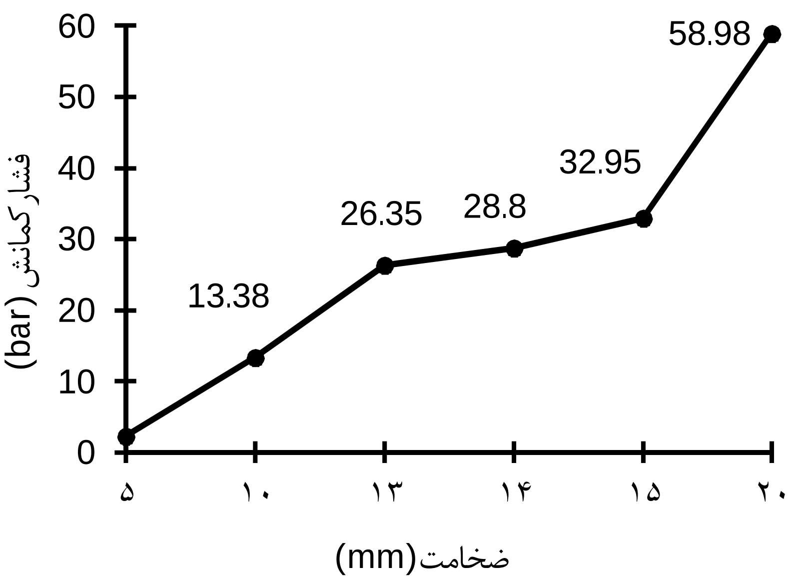
همچنین نتایج بدست آمده از نتایج غیرخطی برای مخزن در حالت بدون دریچه در شکل 11 نشان داده شده است، با توجه به این نتایج دیده می‌شود که بهترین ضخامت برای تحمل فشار 30 بار برای مخزن کامپوزیتی بدون دریچه 15 میلی‌متر به دست آمده است. در حقیقت هر دو نتیجه اخیر نشان می‌دهد که مخزن بدون دریچه با ضخامت 15 میلی‌متر می‌تواند فشار 30 بار را تحمل نماید بدون آنکه در آن شکست یا کمانش رخ دهد.

با توجه به الزامات طراحی و شرایط کاری مخزن، سه دریچه مطابق شکل 14 در سطح مخزن ایجاد شد. بعبارت دیگر سه دریچه دایره‌ای شکل با قطرهای 120،60 و 60 میلی‌متر به ترتیب در زاویه‌های 60، 30 و 0 درجه نسبت به محور قائم مخزن ایجاد گردید.

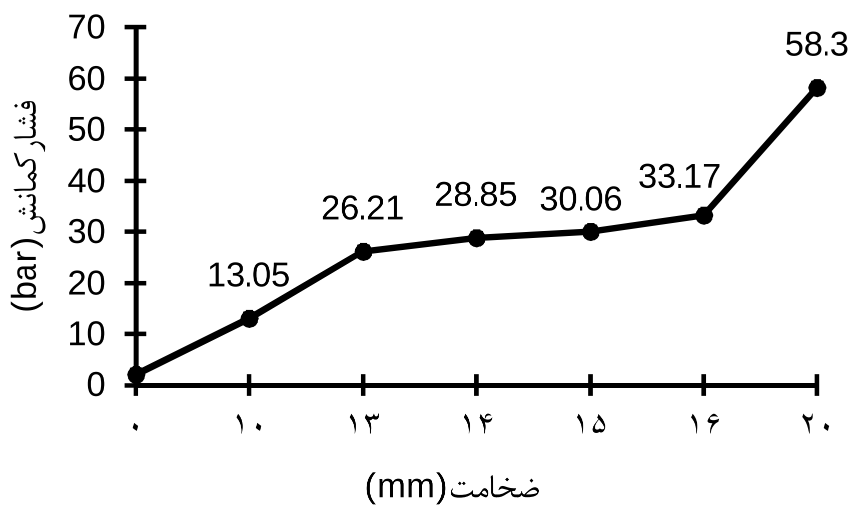
مشابه شرایط واقعی، در نرم‌افزار نیز دریچه‌ها در لوله ایجاد گردید. با توجه به اثر دریچه در کاهش فشار کمانشی، تأثیر ایجاد این دریچه‌ها در طراحی به دست آمد. همچنین با توجه به شکل‌های 12 و 13، بهترین ضخامت برای تحمل این فشار برای مخزن کامپوزیتی با دریچه، 16 میلی‌متر به دست آمد. البته این میزان ضخامت برای مخزن کامپوزیتی با سه دریچه با اندازه‌های نشان داده شده در شکل 14 به دست آمده است.



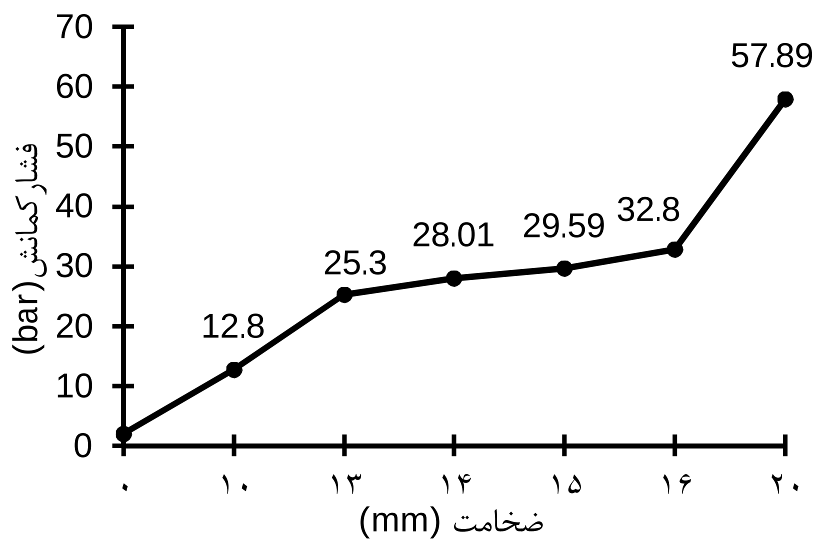
شکل10 نمودار فشار- ضخامت درحالت خطی برای مخزن کامپوزیتی بدون دریچه



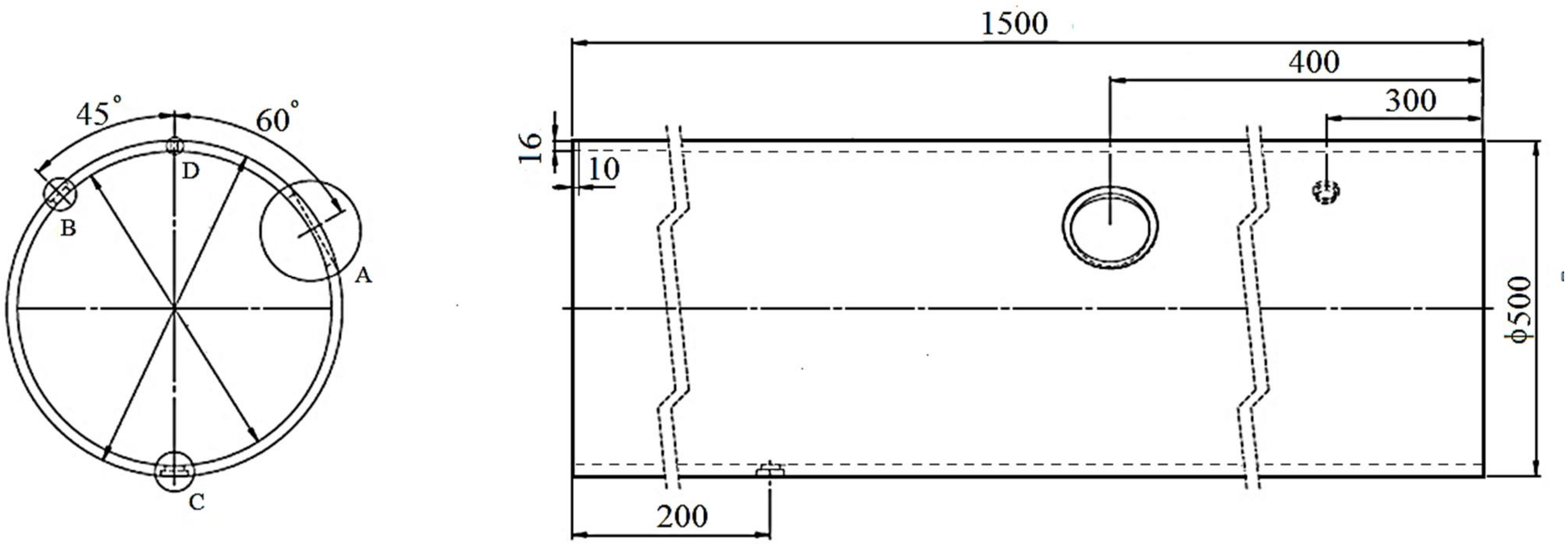
شکل11 نمودار فشار- ضخامت درحالت غیرخطی برای مخزن کامپوزیتی بدون دریچه



شکل12 نمودار فشار- ضخامت درحالت خطی برای مخزن کامپوزیتی با دریچه



شکل13 نمودار فشار- ضخامت درحالت غیرخطی برای مخزن کامپوزیتی با دریچه



شکل14 طراحی مدل مخزن و محل قرارگیری دریچه‌ها

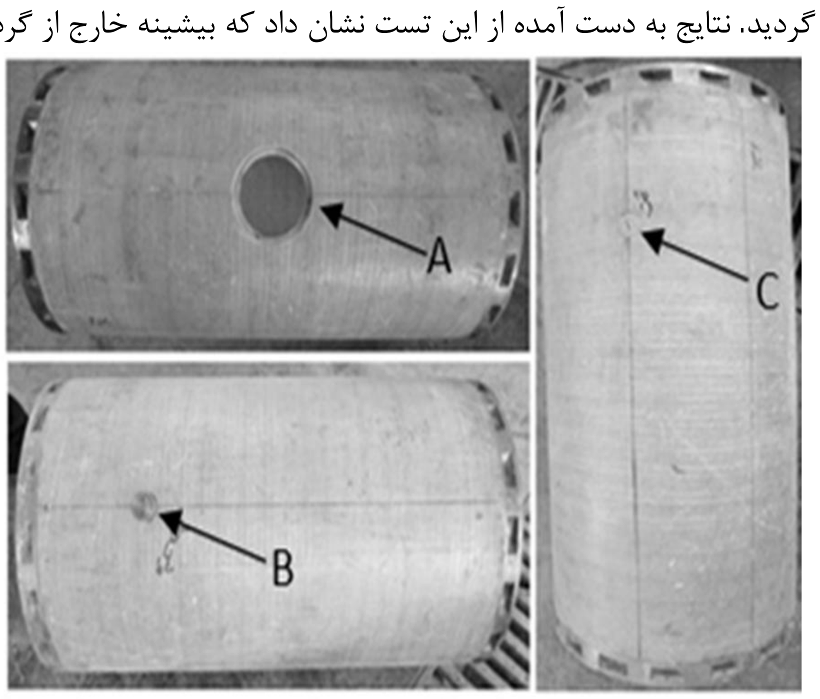
بنابراین مقایسه نتایج شبیه‌سازی در حالت‌های بدون دریچه و با دریچه مخزن نشان می‌دهد که با افزایش اندازه و یا تعداد دریچه، باید ضخامت مخزن در حالت دریچه‌دار بیشتر از ضخامت مخزن در حالت بدون دریچه باشد تا بتواند مقامت بیشتری نسبت به کمانش در فشار ثابت 30 بار را داشته باشد. با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل‌های خطی و غیرخطی مخازن در حالت‌های با دریچه و بدون دریچه، حداقل ضخامت مجاز مخزن جهت تحمل فشار 30 بار برابر 16 میلی‌متر به دست آمد و بر اساس این مقدار ضخامت، دیگر تحلیل‌های مخزن انجام گردید. پس از تحلیل خطی و غیر خطی کمانش برای مخزن با دریچه و بدون دریچه، مطابق شکل 14 نقشه مخزن طراحی شده و جایگاه دریچه‌ها، برای ساخت نمونه واقعی به دست آمد.

3-4- نتایج تست فشار هیدرواستاتیک خارجی

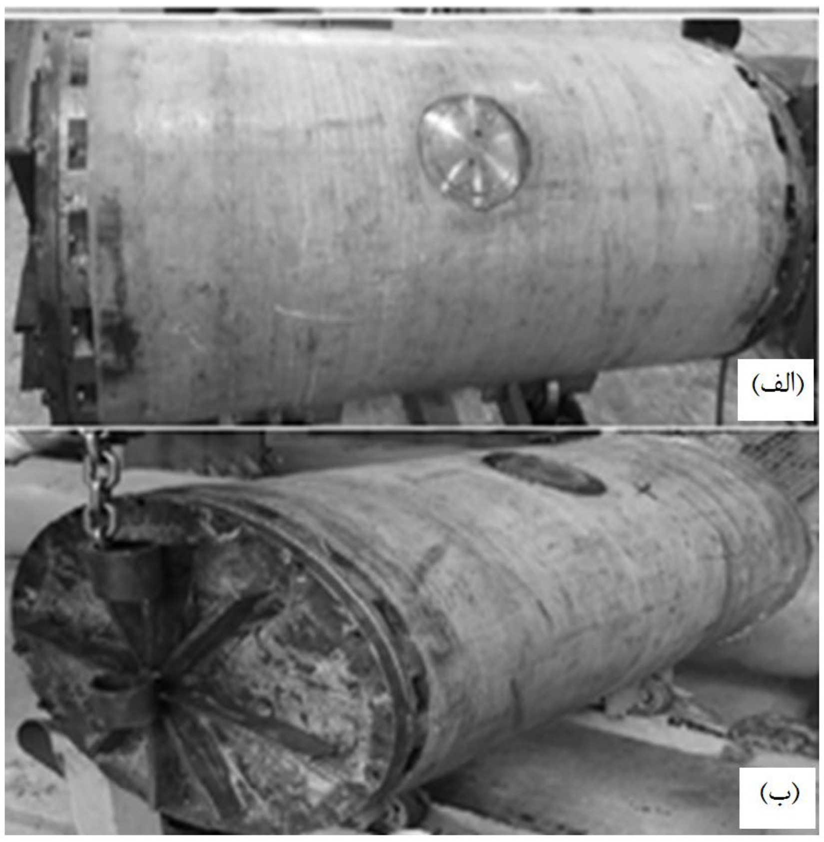
همانگونه که بیان گردید نمونه واقعی مخزن بر اساس طرح بیان شده در شکل 14 ساخته شد. سپس دریچه‌های دایره‌ای مطابق شکل 15، بر روی مخزن ساخته شده ایجاد گردید. جهت آب‌بندی دریچه‌های ایجاد شده از اتصالات مکانیکی رزوه‌ای استفاده شد. همچنین دو انتهای مخزن نیز با اتصال فلنج‌های چسبی و درپوش‌های نشان داده شده در شکل آب‌بندی گردید.

بر اساس شرایط کاری مخزن بررسی شده در این پژوهش، مخزن ساخته شده دارای سه دریچه، باید فشار 30 بار را به‌گونه‌ای تحمل می‌کرد که کوچکترین تغییر شکل درآن رخ ندهد و مخزن بتواند به‌طور کاملاً سالم این فشار را تحمل نماید. پس از ساخت و آب‌بندی دو انتها و دریچه‌ها، مخزن در مجموعه تست نشان داده شده در شکل 7 قرار داده شد و فشار به صورت خطی از 0 تا 30 بار و در مدت 10 دقیقه افزایش داده شد. سپس به مدت یک ساعت مخزن در فشار 30 بار قرار داده شد و پس از آن فشار به صورت خطی کاهش داده شد. شکل 16، مخزن دریچه‌دار آزمایش شده تحت فشار خارجی 30 بار را قبل و بعد از آزمایش نشان می‌دهد.

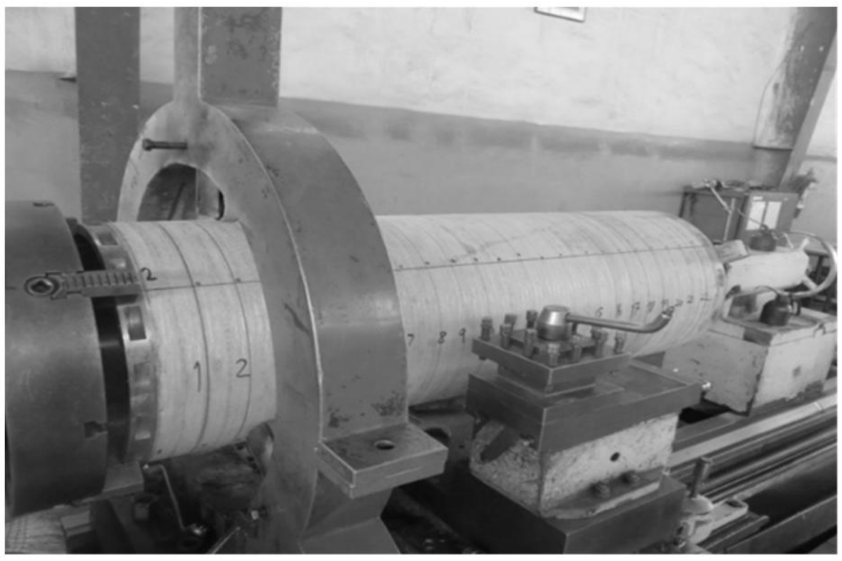
پس از انجام تست فشار خارجی بر روی مخزن با سه دریچه، همانطور که در شکل 17 دیده می‌شود برای بررسی میزان تغییرشکل، مخزن بر روی یک دستگاه تراش 6 متری قرار گرفت و سپس 4 خط طولی و 22 خط محیطی روی بدنه مخزن ترسیم گردید و میزان خارج از گردی هر خط محیطی در چهار نقطه حاصل تقاطع آن با خط طولی توسط ساعت اندازه‌گیری بررسی گردید. نتایج به دست آمده از این تست نشان داد که بیشینه خارج از گردی



شکل 15 مخزن ساخته شده با سه دریچه



شکل ۱۶ مخزن کامپوزیتی دریچه دار، الف- پیش از تست، ب- پس از تست



شکل ۱۷ بررسی خروج از گردی مخزن کامپوزیتی

مخزن برابر ۰/۸ میلی‌متر به دست آمد. این مقدار خارج از گردی با مقدار خارج از گردی پیش از آزمایش مقایسه شده و دیده شد که هیچ تغییری در مقدار خارج از گردی بر اثر آزمایش فشار خارجی در مخزن رخ نداده است. به عبارت دیگر با توجه به بررسی انجام گرفته، مشخص شد که مخزن دریچه‌دار، بدون کوچکترین تغییرشکل توانست فشار ۳۰ بار را تحمل کند. همچنین در محل اتصال دریچه‌ها و فلنج‌ها هیچ‌گونه نشتی رخ نداد که نشان دهنده نحوه صحیح آب‌بندی و عدم شکست یا ایجاد ترک ریز در اطراف دریچه‌های ایجاد شده بود.

۴-۴- بررسی اثر دریچه بر ظرفیت فشار کمانش مخزن

۴-۴-۱- بررسی اثر اندازه دریچه بر کمانش مخزن

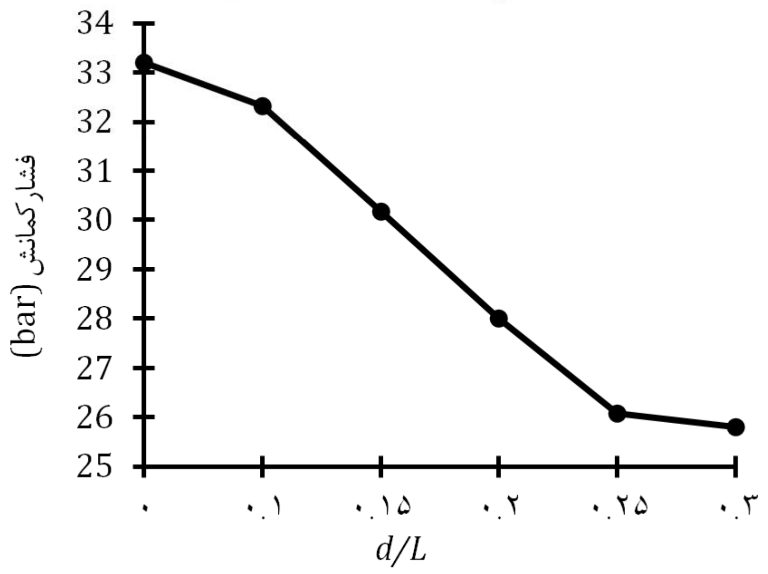
با توجه به بررسی کمانش غیرمتقارن که در حقیقت نوعی شکست سازه‌ای را بیان می‌کند از این قسمت به بعد، تنها از تحلیل خطی کمانش جهت بررسی پارامترها استفاده گردید. یکی از مواردی که در رفتار کمانشی مخزن مؤثر است، اندازه دریچه می‌باشد. اندازه دریچه می‌تواند تأثیر زیادی در رفتار کمانشی مخازن داشته باشد در نتیجه باید اثر آن در رفتار کمانشی مورد تجزیه و تحلیل قرارگیرد. برای این منظور در ابتدا مخزنی به طول (L) ، قطر (D) و ضخامت (t) مدل گردید و یک دریچه با قطر(d) در آن ایجاد گردید و درنهایت به بررسی پارامترهای مختلف و اثر آن در رفتار کمانشی مخزن کامپوزیتی پرداخته شده است.

شکل۱۸ اثر افزایش نسبت $\frac{d}{L}$ را روی بار کمانشی مخزن نشان می‌دهد همانطور که از شکل مشاهده می‌شود با افزایش نسبت$\frac{d}{L}$ فشارکمانش کاهش می‌یابد، به‌طوریکه با افزایش نسبت $\frac{d}{L}$=۰/۳ فشار کمانش حدود ۲۲٪ کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل می‌توان دریافت که تا $\frac{d}{L}$=۰/۲۵ ، شیب نمودار بیشتر از سایر نقاط است و پس از آن شیب نمودار کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر بعد از $\frac{d}{L}$=۰/۲۵ تأثیر کمتری در کاهش فشار کمانش مشاهده می‌شود.

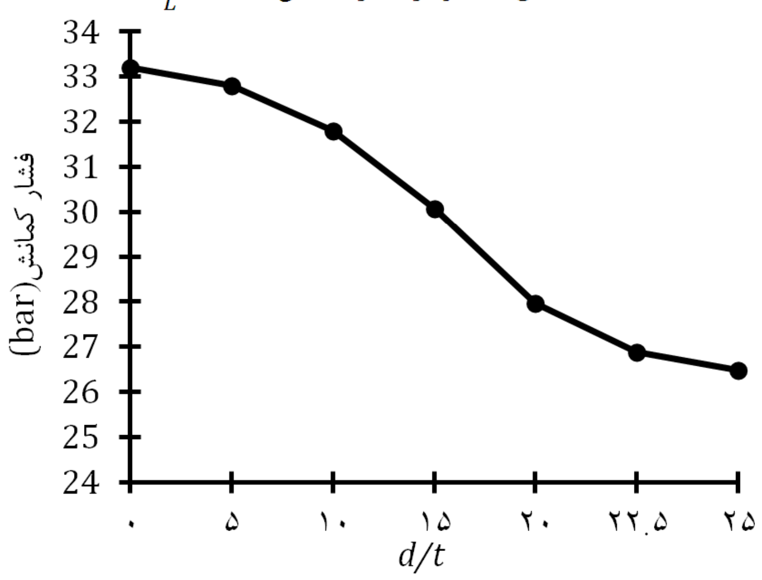
شکل ۱۹ اثر افزایش نسبت $\frac{d}{t}$ برروی فشار کمانش نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود با افزایش نسبت $\frac{d}{t}$ فشار کمانش کاهش می‌یابد، به طوریکه تا نسبت $\frac{d}{t}$ فشار کمانش به میزان ۲۰٪ نسبت به ۰= $\frac{d}{t}$ کاهش می-یابد. همچنین با توجه به شکل، مشاهده می‌گردد که تا نسبت ۲۰= $\frac{d}{t}$ شیب نمودار نسبت به سایر نقاط بیشتر است و میزان کاهش فشار کمانش بیشتر احساس می‌شود و در حدود ۱۵/۷۸٪ می‌باشد و بعد ازآن شیب نمودار کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر تأثیر این نسبت در فشار کمانش کاهش می‌یابد.

شکل۲۰ اثر افزایش نسبت $\frac{d}{D}$ بر روی فشار کمانش را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود با افزایش نسبت $\frac{d}{D}$ فشار کمانش کاهش می‌یابد، به طوریکه تا نسبت $\frac{d}{D}$=۰/۷ فشار کمانش به میزان ۱۳/۵۵٪ کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل، مشاهده می‌گردد که تا نسبت $\frac{d}{D}$ =۰/۶ شیب نمودار نسبت به سایر نقاط بیشتر است و بعد ازآن شیب نمودار کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر تأثیر این نسبت در فشار کمانش کاهش می‌یابد.

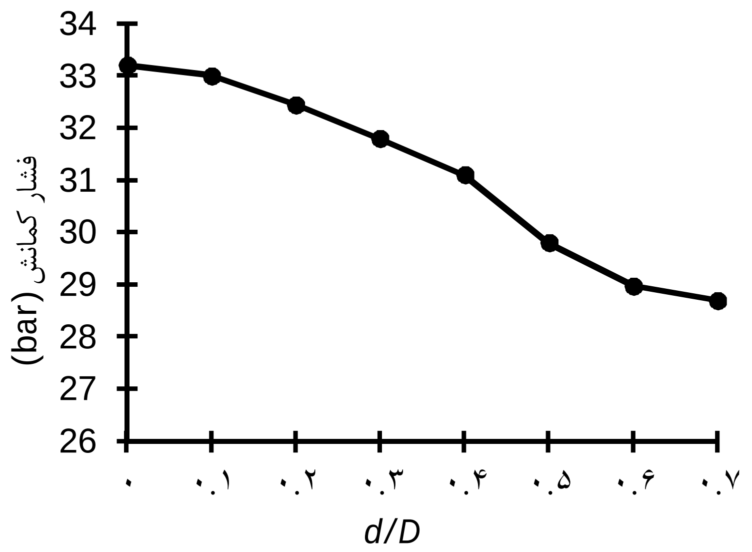
شکل۲۱ اثر افزایش اندازه دریچه در نسبت $\frac{L}{D}$ های مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشاهده می‌گردد با افزایش اندازه دریچه و همچنین با افزایش نسبت $\frac{L}{D}$ فشارکمانش کاهش می‌یابد.



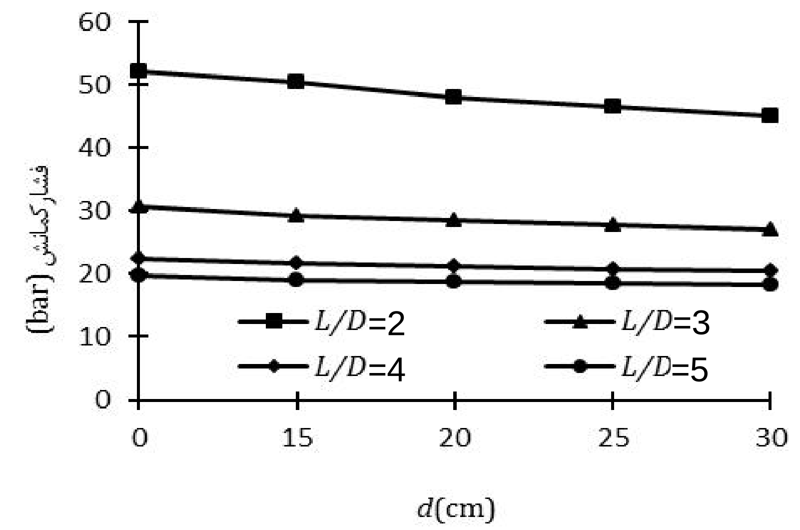
شکل ۱۸ نمودار فشار کمانش با نسبت $\frac{d}{L}$



شکل ۱۹ نمودار فشار کمانش با نسبت $\frac{d}{t}$

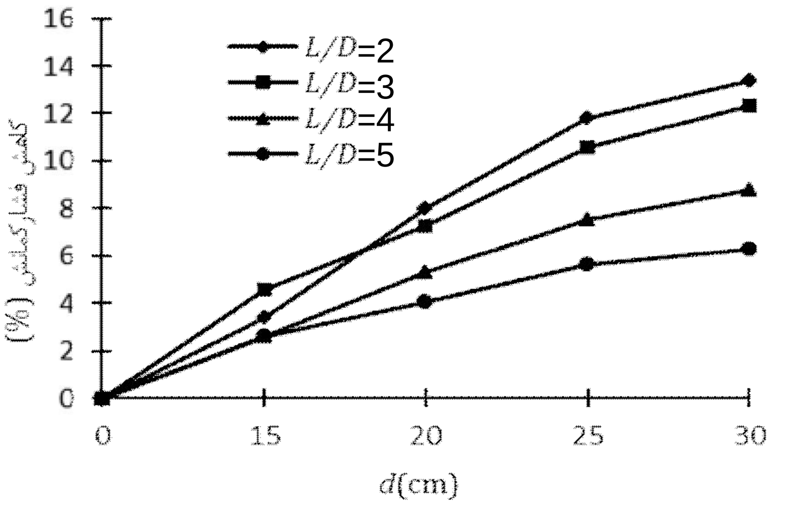


شکل20 نمودار فشار کمانش با نسبت $\frac{d}{D}$



شکل21 اثر افزایش اندازه دریچه در نسبت $\frac{L}{D}$ های مختلف

شکل22 درصد کاهش فشار کمانش با اندازه‌های مختلف دریچه در نسبت‌های مختلف $\frac{L}{D}$ را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود با افزایش اندازه دریچه فشار کمانش نسبت به مخزن بدون دریچه کاهش می‌یابد، البته درصد این کاهش فشار کمانش در $\frac{L}{D}$ های مختلف متفاوت می‌باشد به‌طوری با افزایش $\frac{L}{D}$ میزان درصد کاهش فشار کمانش کاهش می‌یابد به‌عبارت دیگر اثر افزایش اندازه دریچه کمتر احساس می‌شود به‌طوری‌که افزایش اندازه دریچه تا 30 میلی‌متر در $\frac{L}{D}$=2 میزان فشار کمانش را 13/4% و در $\frac{L}{D}$=5 فشار کمانش را 6/3% کاهش می‌یابد. درنتیجه حساسیت مخزن کامپوزیتی در برابر افزایش اندازه دریچه در نسبت $\frac{L}{D}$ های بزرگتر کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شده است که با افزایش اندازه دریچه پس از 25 سانتی‌متر تأثیر کمتری در کاهش فشار کمانش دارد. به‌عبارت دیگر از شیب نمودار کاسته شده است.



شکل22 اثر افزایش اندازه دریچه در فشار کمانش مخزن کامپوزیتی

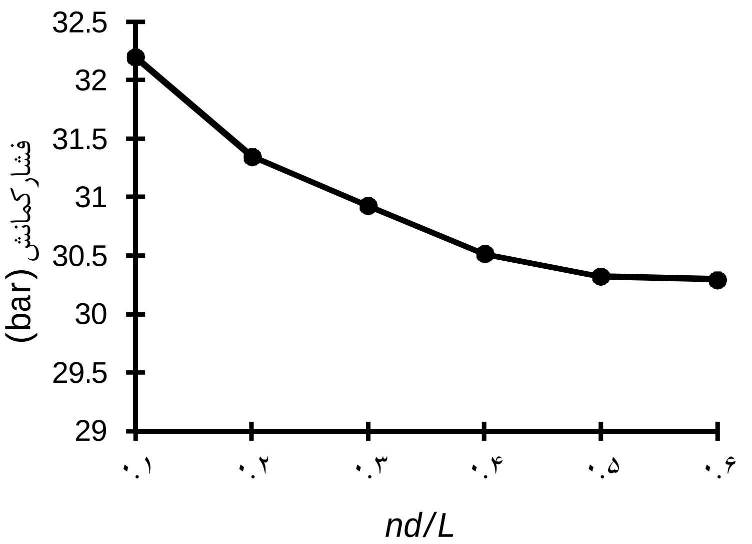
2-4-4- بررسی اثر افزایش تعداد دریچه بر کمانش مخزن

تعداد دریچه نیز می‌تواند تأثیر بسزایی در رفتار کمانشی مخزن کامپوزیتی داشته باشد، در نتیجه باید اثر تعداد دریچه رفتار کمانشی مخزن بـه درستی درک گردد تا به طراحی ایمن سازه کمک نماید. بـرای ایـن منظـور در ابتـدا مخزنی به طول (L)، قطر (D) و ضخامت (t) مدل گردید و n تعـداد، دریچـه بـا قطر(d) در آن ایجاد گردید و در نهایت به بررسی پارامترهای مختلف و اثر آن در رفتار کمانشی مخزن کامپوزیتی پرداخته شده است.

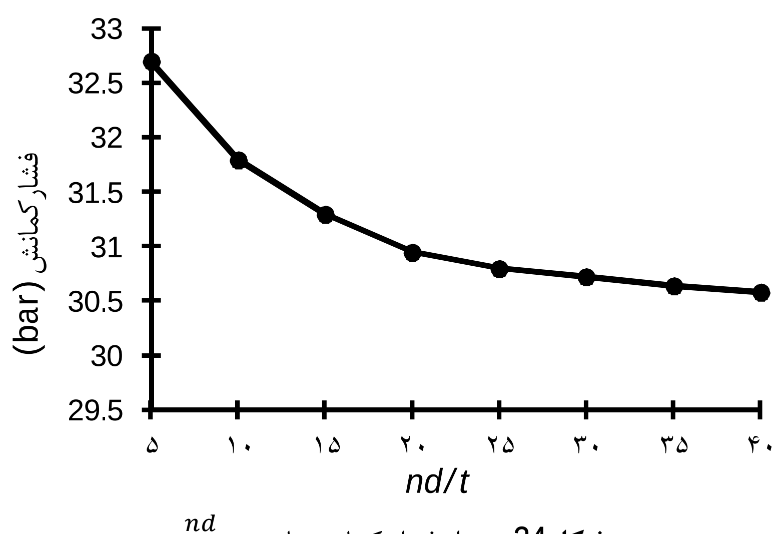
شکل23 اثر افزایش نسبت $\frac{nd}{L}$ را روی بار کمانشی مخزن نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشاهده می‌شود با افزایش نسبت $\frac{nd}{L}$ فشارکمانش کاهش می‌یابد، به‌طوریکه با افزایش نسبت $\frac{nd}{L}$ از 0/1 تا 0/6 فشارکمانش حدود 6% کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل به وضوح می‌توان دریافت که تا $\frac{nd}{L}$=0/4 شیب نمودار بیشتر از سایر نقاط است و پس از آن، شیب نمودار کاهش می‌یابد، به‌عبارت دیگر بعد از $\frac{nd}{L}$=40 ، تأثیر کمتری در کاهش فشار کمانش مشاهده می‌شود.

شکل24 اثر افزایش نسبت $\frac{nd}{t}$ بر روی فشار کمانش را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود با افزایش نسبت $\frac{nd}{t}$ فشار کمانش کاهش می‌یابد، به طوریکه تا نسبت $\frac{nd}{t}$ =40 فشار کمانش به میزان 7/8% نسبت به $\frac{nd}{t}$ =0 کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل، مشاهده می‌گردد که تا نسبت $\frac{nd}{t}$=30 شیب نمودار نسبت به سایر نقاط بیشتر است و میزان کاهش فشار کمانش بیشتر احساس می‌شود و در حدود 7/4% می‌باشد و بعد ازآن شیب نمودار کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر تأثیر این نسبت در فشار کمانش کاهش می‌یابد.

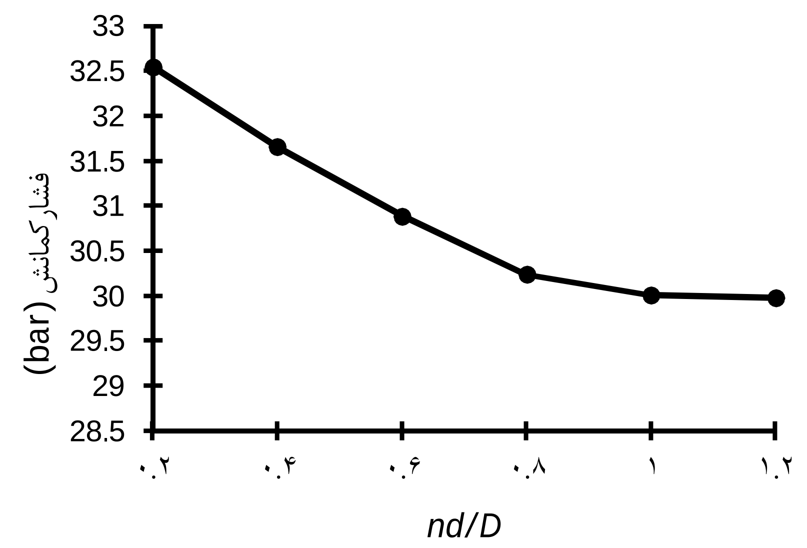
شکل25 اثر افزایش نسبت $\frac{nd}{D}$ بر روی فشار کمانش را نشـان مـی‌دهـد. همانطور که دیده می‌شود با افزایش نسبت $\frac{nd}{D}$ فشار کمانش کاهش می‌یابد،



شکل23 نمودار فشار کمانش با نسبت $\frac{nd}{L}$



شکل24 نمودار فشار کمانش با نسبت $\frac{nd}{t}$



شکل25 نمودار فشار کمانش با نسبت $\frac{nd}{t}$

به طوریکه تا نسبت $\frac{nd}{D}$=1/2 فشار کمانش به میزان 9/6% کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل، مشاهده می‌گردد که تا نسبت $\frac{nd}{D}$=0/8 شیب نمودار نسبت به سایر نقاط بیشتر است.

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش رفتار مکانیکی مخزن کامپوزیتی با سه دریچه دایره‌ای بررسی شده است، بطوریکه این مخزن بتواند فشار 30 بار را تحمل نماید. به این منظور، جهت پیش‌بینی صحیح رفتار مکانیکی مخزن کامپوزیتی دریچه‌دار، ابتدا دو نمونه مخزن کامپوزیتی با مقیاسی نسبت به مخزن دریچه‌دار تحت فشارخارجی تخریب گردید و صحت سنجی نتایج شبیه‌سازی با این آزمایش‌ها بررسی گردید. سپس با استفاده از شبیه‌سازی، بهترین ضخامت مخزن برای تحمل فشار30 بار در حالت بدون و با دریچه برآورد گردید. پس از یافتن بهترین ضخامت، مخزن دریچه‌دار طراحی و ساخته شد و در مجموعه تست فشار، تحت فشار خارجی یکنواخت 30 بار قرار گرفت. پس از تست، مخزن دریچه‌دار توانست این فشار را بدون کوچکترین تغییر شکل، شکست یا ترک خوردگی تحمل نماید.

سپس جهت تعمیم‌دهی نتایج به دست آمده در حالت‌های کلی، با بی‌بعد کردن متغیرها، اثر موقعیت، اندازه و تعداد دریچه در یک مخزن دریچه‌دار نسبت به بار کمانش با شبیه‌سازی به دست آمد که خلاصه نتایج آن به شرح زیر است:

1- بهترین ضخامت برای مخزن با سه دریچه و با ابعاد و خصوصیات مکانیکی بیان شده در این پژوهش در فشار 30 بار ، 16 میلی‌متر به دست آمد.

2- ایجاد دریچه باعث کاهش فشار کمانش مخزن می‌گردد و با افزایش اندازه دریچه میزان درصد این کاهش افزایش می‌یابد.

3- با افزایش نسبت $\frac{d}{L}$ فشارکمانش کاهش می‌یابد، به‌طوریکه با افزایش نسبت $\frac{d}{L}$=0/3 فشار کمانش نسبت به حالت $\frac{d}{L}$ =0 حدود 22% کاهش می‌یابد.

4- با افزایش نسبت $\frac{d}{t}$ فشار کمانش کاهش می‌یابد، به طوریکه تا نسبت $\frac{d}{t}$ فشار کمانش به میزان 20% نسبت به $\frac{d}{t}$ =0 کاهش می‌یابد.

5- با افزایش نسبت $\frac{d}{D}$، فشار کمانش کاهش می‌یابد، به‌طوریکه تا نسبت $\frac{d}{D}$=0/7 فشار کمانش به میزان 13/55% کاهش می‌یابد.

6- با افزایش اندازه دریچه فشار کمانش نسبت به مخزن بدون دریچه کاهش می‌یابد، البته درصد این کاهش فشار کمانش در $\frac{L}{D}$ های مختلف متفاوت می‌باشد به‌طوری با افزایش $\frac{L}{D}$ میزان درصد کاهش فشار کمانش کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر اثر افزایش اندازه دریچه کمتر احساس می‌شود به‌طوری‌که افزایش اندازه دریچه تا 30 میلی‌متر در $\frac{L}{D}$=2 میزان فشار کمانش را 13/4% و در $\frac{L}{D}$=5 فشار کمانش را 6/3% کاهش می‌یابد. درنتیجه حساسیت مخزن کامپوزیتی در برابر افزایش اندازه دریچه در نسبت $\frac{L}{D}$ های بزرگتر کاهش می‌یابد.

7- با افزایش نسبت $\frac{nd}{L}$ فشارکمانش کاهش می‌یابد، به‌طوریکه با افزایش نسبت $\frac{nd}{L}$ از 0/1 تا 0/6 فشارکمانش حدود 6% کاهش می‌یابد.

8- با افزایش نسبت $\frac{nd}{t}$ فشار کمانش کاهش می‌یابد، به طوریکه تا نسبت $\frac{nd}{t}$ =40 فشار کمانش به میزان 7/8% نسبت به $\frac{nd}{t}$ =0 کاهش می‌یابد.

9- با افزایش نسبت $\frac{nd}{D}$ فشار کمانش کاهش می‌یابد، به طوریکه تا نسبت $\frac{nd}{D}$=1/2 فشار کمانش به میزان 9/6% کاهش می‌یابد.

6- فهرست علائم

D	قطرمخزن (m)
d	قطر دریچه (cm)
E	مدول یانگ (GPa)
G	مدول برشی (GPa)
L	طول لوله (m)
n	تعداد دریچه
t	ضخامت مخزن (mm)
ν	ضریب پؤاسن
V_f	کسر حجمی الیاف
W_f	وزن الیاف (gr)
W_m	ورزن ماتریس (gr)

علائم یونانی

ρ_f	چگالی الیاف (kgm^{-3})
ρ_m	چگالی ماتریس (kgm^{-3})
σ^C	استحکام فشاری (MPa)
σ^T	استحکام کششی (MPa)
τ	استحکام برشی (MPa)

7- مراجع

[1] A. Sabik, I. Kreja, Stability analysis of multilayered composite shells with cut-out, *Archives Of Civil And Mechanical Engineering,* Vol. 11, pp. 195–207,2011.

[2] J. Ramaniah, K. Jagan, M. Rao, Buckling analysis of orthotropic composite shell with and without cutouts using fem, *International Journal of Engineering Research & Technology,* Vol. 2, pp. 2042-2049, 2013.

[3] M. Yazici, Influence of Cut-Out Variables on Buckling Behavior of Composite Plates, *Journal of Reinforced Plastics and Composites,* Vol. 28, pp. 2335-2339, 2009.

[4] C. J. Moon, I.H. Kim, B.H. Choi, J.H. Kweon, J.H. Choi, Buckling of filament-wound composite cylinders subjected to hydrostatic pressure for underwater vehicle applications, *Journal of Composite Structures,* Vol. 92, pp. 2241–2251, 2010.

[5] S.H. Hur, H.J. Son, J.H. Kweon, J.H. Choi, Post buckling of composite cylinders under external hydrostatic pressure, *Journal of Composite Structures,* Vol. 86, pp. 114-124, 2008.

[6] A. Tafreshi, Delamination buckling and postbuckling in composite cylindrical shells under external pressure, *Thin-Walled Structures,* Vol. 42, pp.1379–1404, 2003.

[7] A. Tafreshi, Buckling and post-buckling analysis of composite cylindrical shells with cutouts subjected to internal pressure and compression loads, *International Journal of pressure vessels and piping,* Vol. 79, pp.351-359, 2002.

[8] H. Allahbakhsh , M. Shariati, Buckling of Cracked laminated composite cylindrical shells subjected to combined loading, *An International Journal for the Science and Application of Composite Materials,* Vol.19, pp. 761-772, 2012.

[9]N. Philip, C. Prabha, The Experimental Model of the Pipe Made of a

Composite Material under the Effect of Internal Pressure, *International Journalof Emerging Technology and Advanced Engineering,* Vol. 3, pp. 368-377, 2013.

[10] S. Shi, Z. Sun, M. Ren, H. Chen , X. Hub, Buckling response of advanced grid stiffened carbon–fiber composite cylindrical shells with reinforced cutouts, *Composites: Part B,* Vol. 44, pp.26-33, 2013.

[11] P.F. Liu, L.J. Xing, J.Y. Zheng, Failure analysis of carbon fiber/epoxy composite cylindrical laminates using explicit finite element method, *Composites: Part B,* Vol.56, pp.54-61, 2014.

[12] R.S. Priyadarsini, V. Kalyanaraman, Numerical and experimental study of buckling of advanced fiber composite cylinders under axial compression, *Composites Part B,* Vol.31 ,pp. 669-79, 2000.

[13] M.H. Kim, J.R. Cho, W.B. Bae, J.H. Kweon, J.H. Choi, S.R. Cho, Y.S. Cho, Buckling analysis of filament-Wound thick Composite cylinder under hydrostatic Pressure, *International Journal of Precision Engineering And Manufacturing,* Vol. 11, pp.909-913, 2010.

[14] B. Cai, Y. Liu, H. Li,Z. Liu, Buckling analysis of composite long cylinders using probabilistic finite element method, *Mechanika,* Vol. 17, pp. 467-473, 2011.

[15] E. Frulloni, J.M. Kenny, P. Conti, L. Torre, Experimental study and finite element analysis of the elastic instability of composite lattice structures for aeronautic applications, *Composite Structures,* Vol. 78, pp. 519–528, 2007.

[16] W. Hilburger, Buckling and Failure of Compression-loaded Composite Laminated Shells with Cutouts Laminated Shells with Cutouts, *48th, AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures Structural Dynamics, and Materials Conference* ,Honolulu, Hawaii , 2007.

[17] A. Dey, K.M. Pandey, P. L. Choudhury, A comparison study of filament wound composite cylindrical shell used in under water vehicle application by finite element method, *5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference, IIT Guwahati, Assam, India,* 2014.

[18] M. Govindaraj, N. Murthy, H. Narayanarao, K.Munishaiah, R. Nagappa, Comparative study of metallic and polymer composite shells for underwater vessels using FEA", *International Journal of Ocean System Engineering,* Vol. 3, pp. 136-141, 2013.

[19] M.H. Kim, J.R. Cho, W.B. Bae, J.H. Kweon, J.H. Choi, S.R. Cho, Y.S. Cho, Buckling analysis of filament-Wound thick Composite cylinder under hydrostatic Pressure, *International Journal of Precision Engineering And Manufacturing,* Vol. 11, pp. 909-913, 2010.

[20] H. Yousefinezhad Gildeh, M. Elyasi, M. Zabihpoor*, 8thStudent Conference On Mechanical Engineering, Guilan, Iran*, 2014. (In Persian)

[21] P. Kollar, S. George, Mechanical of composite structure, *NEW YORK Cambridge University Press,* 2003.