



شبیه‌سازی عددی رفتار مخزن سوخت CNG ساخته شده از کامپوزیت اپوکسی/شیشه در حالت‌های طراحی با ضخامت ثابت و متغیر تحت آزمون فشار ترکیدگی

مجید نوری کمری¹، فرامرز آشنای قاسمی^{2*}، غلام حسین رحیمی شهرباف³، کاظم رضاکاشی زاده⁴

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت معلم شهید رجایی، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت معلم شهید رجایی، تهران

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

4- دانشیار، دانشکده حمل و نقل، آکادمی مهندسی، دانشگاه دوستی ملل روسیه، مسکو

* تهران، صندوق پستی 136-16785، f.a.ghasemi@sru.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در مطالعه حاضر، استحکام نهایی شکست مخزن سوخت CNG نوع 4 تحت آزمون فشار ترکیدگی در دو حالت ضخامت ثابت و متغیر با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود تحلیل شد. سپس به بهینه‌سازی زاویه پیچش الیاف به منظور دستیابی به حداکثر مقاومت در برابر فشار ترکیدگی در هر دو مدل پرداخته شد. بدین منظور از مشخصات آزمون بیان شده در استاندارد UNECE R 110: 2016 و تعیین معیار تنش معادل فون میسز جهت مشخص نمودن ناحیه بحرانی و مستعد به شکست در مخزن استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در دو حالت طراحی ضخامت ثابت و متغیر جدایش به ترتیب در فلنج پایین مخزن و محل پوسته انتهای پایین رخ داده است. صحت سنجی شبیه‌سازی اجزای محدود ارائه شده برای پیش‌بینی فشار ترکیدگی در هر دو حالت طراحی (ضخامت ثابت و متغیر) با استفاده از تکنیک مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان داد که تطابق قابل قبولی میان نتایج تجربی و عددی برقرار بوده است. همچنین نتایج نشان داد که بهینه‌ترین زاویه پیچش الیاف جهت دستیابی به حداکثر مقاومت در برابر فشار ترکیدگی در دو حالت طراحی ضخامت ثابت و متغیر به ترتیب برابر با 23 درجه (در فشار 670 بار) و 15 درجه (در 780 بار) بوده است. در نهایت، بکارگیری نتایج این پژوهش می‌تواند منجر به افزایش 22 درصدی استحکام نهایی شکست مخزن کامپوزیتی نوع 4 شود.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 8 تیر 1400
داوری اولیه: 27 تیر 1400
پذیرش: 11 شهریور 1400

کلیدواژه‌ها:

مخزن سوخت CNG
مخزن کامپوزیتی نوع 4
زاویه پیچش الیاف
فشار ترکیدگی
ناحیه شکست

Numerical simulation of CNG fuel tank behavior made of epoxy/glass composite in design mode considering constant and variable thicknesses under burst pressure test

Majid Nouri Kamari¹, Faramarz Ashenai Ghasemi^{1*}, Gholam Hossein Rahimi Sherbaf², Kazem Reza Kashyzaadeh³

1- Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

3- Department of Transport, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN), Moscow, Russia.

P.O.B. 16785-136 Tehran, Iran, f.a.ghasemi@sru.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 29 June 2021
First Decision: 19 July 2021
Accepted: 2 September 2021

Keywords:

CNG fuel tank
Type-IV composite tank
Fiber twist angle
Burst pressure
Failure zone

Abstract

In the present study, failure strength of the type-IV CNG fuel tank under burst pressure test in both constant and variable thicknesses was analyzed using finite element simulation. Afterward, optimal fiber twist angle was optimized to achieve maximum resistance to burst pressure in both models. To this end, the test specifications stated in NECE R 110: 2016 standard and von Mises yield criterion were used to determine the critical area which is prone to failure in the tank. The simulation results showed that the separation occurred in the lower flange of the tank and the location of the low curvature shell in the tank with the constant and variable thicknesses, respectively. Validation of presented finite element simulation for prediction of burst pressure in both design modes, including constant and variable thicknesses, using the technique of comparison with experimental results showed that an acceptable agreement was established between the experimental and numerical results. Also, the results showed that the optimal fiber twist angle to achieve maximum resistance to burst pressure for both design cases (constant and variable thicknesses) was 23° (670 bar) and 15° (780 bar), respectively. Finally, applying the results of this study can lead to a 22% increase in the failure strength of the type-IV composite tank.

Please cite this article using:

M. Nouri Kamari, F. Ashenai Ghasemi, Gh. H. Rahimi Sherbaf, K. R. Kashyzaadeh, Numerical simulation of CNG fuel tank behavior made of epoxy/glass composite in design mode considering constant and variable thicknesses under burst pressure test, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 7, pp. 20- 30, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

ایران جزو پنج کشور تولیدکننده و دومین کشور مصرف‌کننده گاز در دنیا است که به منظور کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی متداول مانند بنزین و گازوئیل، برنامه استفاده از سوخت گاز طبیعی را به طور جدی در دستور کار دولت و شرکت‌های صنعتی و خودروساز قرار داده است [1]. از مهمترین عوامل بازدارنده برای استفاده بیشتر از گاز طبیعی به عنوان سوخت اتومبیل می‌توان به ظرفیت محدود، وزن زیاد و خطرات بالای مخازن فلزی اشاره داشت. با پیدایش مخازن تمام کامپوزیتی (نوع 4) که در آن‌ها آستری فلزی حذف گردیده و استفاده از الیاف با کارایی بالا در بستری از رزین پلیمری منجر به کاهش وزن مخزن شده است و در پی آن موانع بیان شده برای استفاده از گاز طبیعی کاهش یافته است. با این وجود، بازرسی‌های ادواری برای تعیین شرایط ایمنی همراه با تخمین عمر مطمئن انواع مختلف مخازن تحت بارهای استاتیکی و سیکلی بسیار حائز اهمیت است [2]. در این راستا مطالعات بسیار زیادی در حوزه بررسی شکست مخازن سوخت گاز طبیعی متراکم (CNG)¹ و ارایه راه‌کارها به منظور بهبود استحکام آن‌ها انجام شده است. دیناروندی و مظفری [3] به شبیه‌سازی و بررسی کماتش حرارتی و مکانیکی مخازن کامپوزیتی جدار نازک تحت فشار با استفاده از تحلیل المان محدود پرداخته و مقدار زاویه بهینه پیچش الیاف را در مخزن کامپوزیتی اپوکسی-شیشه با 14 لایه الیاف و ضخامت لاینر 7 میلی‌متر برابر با 45 درجه گزارش نمودند. صرافان و همکاران [4] به بهینه‌سازی مخازن جدار ضخیم کامپوزیتی با فشار بالا و زاویه بهینه پیچش الیاف برای یک مخزن کامپوزیتی اپوکسی-شیشه در تعداد لایه چینی‌های مختلف پرداخته و در نهایت مقدار زاویه بهینه برای پیچش الیاف با تعداد 8 لایه را در محدوده 50 تا 60 درجه اعلام نمودند. در مطالعه انجام شده توسط اوندرو و همکاران در سال 2009 [5]، به بررسی حداکثر فشار آزمون ترکیب لوله‌های کامپوزیتی تحت زوایای مختلف پیچش الیاف پرداخته و زاویه پیچش الیاف 55 درجه را به عنوان بهینه‌ترین زاویه برای لوله‌های کامپوزیتی اپوکسی-شیشه معرفی نمودند.

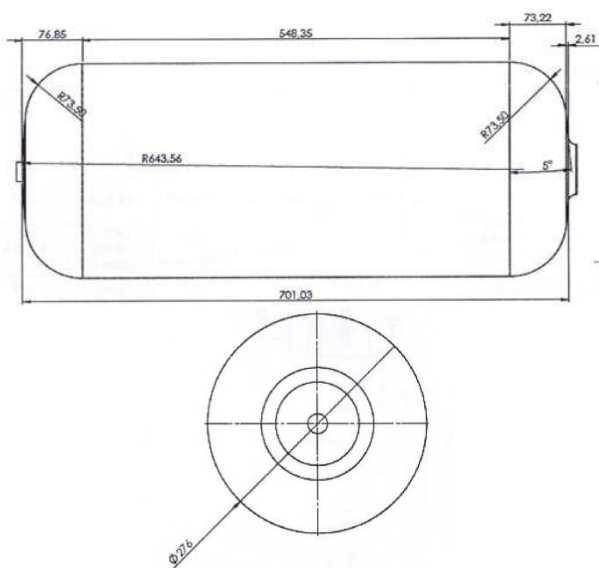
ظهور و همکاران [6] به طراحی مخازن گاز طبیعی فشرده نوع اول (تمام فلزی) برای خودرو پرداختند. پس از پیدایش و رواج یافتن کاربرد انواع مختلف مخازن کامپوزیتی نوع 3 و 4 در صنعت خودروسازی، توجه پژوهشگران به بررسی استحکام شکست و

بهینه‌سازی لایه‌چینی کامپوزیت در آنها تحت فشار داخلی بیش از پیش گسترش یافته است. در این راستا، حیدری رارانی و احمدی جبلی [7] به مدل‌سازی المان محدود خرابی در مخزن تحت فشار کامپوزیتی نوع 4 با استفاده از نرم‌افزار آباکوس پرداختند. در این پژوهش از یک مخزن با ظرفیت 2 لیتر استفاده شده است. لاینر از جنس پلی‌آمید و فلنج‌های فولادی از جنس فلز ضد زنگ 316 در نظر گرفته شده است. بدنه کامپوزیتی به صورت 22 لایه با در نظر گرفتن دو ترکیب مختلف از زوایای الیاف (10، 15، 25، 40، 50، 60 و 90 درجه) با ضخامت‌های یکسان مدل‌سازی شده است. مؤلفه‌های تانسور تنش حاصل از تحلیل استاتیکی مخزن استخراج شده است و سپس به محاسبه تنش معادل با استفاده از معیارهای مختلف شکست کامپوزیت مانند تسای-هیل، تسای-وو و هشین پرداخته شده است. در نهایت با مقایسه نتایج بدست آمده با داده‌های آزمایشگاهی مشخص شد که پایین‌ترین فشار ترکیبگی مخزن توسط معیار تسای-وو و بالاترین فشار ترکیبگی بر اساس معیار تخریب هشین پیش‌بینی شده است. علاوه بر این، بهینه‌سازی وزنی پوسته کامپوزیتی در مخازن تحت فشار نوع 4 با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک توسط خانی و همکاران [8] انجام شده است.

پاتل و همکاران در سال 2013 [9] به بهینه‌سازی مخازن سوخت گاز طبیعی متراکم و گاز طبیعی مایع (LNG)² با هدف کاهش وزن آن با استفاده از تکنیک بکارگیری ماده جایگزین پرداختند. علاوه بر این، پارامترهای ضخامت و شعاع داخلی مخزن به عنوان متغیر در مسئله بهینه‌سازی با هدف به حداقل رساندن تنش و تغییر شکل در مخزن در نظر گرفته شد. بدین ترتیب، آن‌ها توانستند که وزن مخزن را 31% کاهش دهند. سان و چانگ در سال 2012 [10] به بررسی تکنیک‌های مختلف مدل‌سازی مخزن سوخت نوع 3 با در نظر گرفتن لاینر آلومینیومی و کامپوزیت اپوکسی/کربن پرداختند. همچنین، نیربهای و همکاران در سال 2015 [2] به بررسی رفتار استاتیکی مخازن استوانه‌ای تمام کامپوزیتی تحت فشارهای مختلف داخلی با در نظر گرفتن بیشینه مقدار تنش معادل فون میسز پرداختند. در مطالعه انجام شده توسط فرهود و همکاران [11] بر روی مخازن کامپوزیتی نوع 4 با ضخامت ثابت، زوایای مختلف پیچش الیاف جهت دستیابی به استحکام نهایی شکست مخزن مورد بررسی قرار گرفته است و بهینه‌ترین زاویه پیچش الیاف برابر با 15 درجه و فشار ترکیبگی متناظر با آن برابر با 550 بار بدست آمده است.

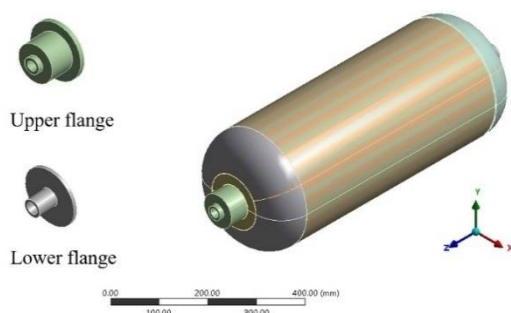
² Liquid Natural Gas¹ Compressed Natural Gas

ضخامت متغیر در نظر گرفته شد. بدین ترتیب که در طراحی مخزن با ضخامت ثابت، ضخامت لاینر و بدنه کامپوزیتی بصورت کاملا یکنواخت در تمامی قسمت‌های مخزن به ترتیب برابر با 8 و 4/4 میلی متر در نظر گرفته شد. به منظور مدل‌سازی هندسی مخزن از نرم افزار کتیا استفاده شده است. همچنین به منظور طراحی مخزن در حالت ضخامت ثابت، مخزن در 4 قسمت مختلف شامل دو فلنج بالا و پایین، لاینر و بدنه کامپوزیتی در نظر گرفته شد. برای شبیه‌سازی بدنه کامپوزیتی بصورت لایه‌ای با در نظر گرفتن زاویه الیاف در نرم‌افزار المان محدود، این قسمت بصورت پوسته مدل شد و دیگر قسمت‌ها بصورت حجمی مدل‌سازی شده‌اند. مجموعه مونتاژ شده مخزن سوخت گاز طبیعی متراکم به همراه متعلقات آن در نرم‌افزار کتیا در شکل 2 نشان داده شده است.



شکل 1 هندسه و اندازه مخزن سوخت CNG با ظرفیت 34 لیتر

Fig. 1 Geometry and size of the 34-liter CNG tank



شکل 2 مجموعه مونتاژ شده مخزن سوخت CNG به همراه متعلقات آن در نرم افزار کتیا

Fig. 2 Assembled CNG fuel tank model and its accessories in CATIA software

علی‌رغم تمام پژوهش‌ها و مطالعات انجام شده در حوزه‌های مختلف مرتبط با مخازن سوخت گاز طبیعی متراکم، هنوز صنعت خودروسازی با مشکلاتی مانند نشتی، پارگی، شکست و انفجار این مخازن روبرو است که گاهی خسارات جبران‌ناپذیری را به همراه دارد. گزارش‌ها و اسناد موجود نشان از تعداد بالای حوادث و جراحات ناشی از انفجار مخازن سوخت گاز طبیعی متراکم در کشور دارد [12]. یکی از مهمترین راه‌کارهای موجود جهت کاهش حوادث ذکر شده، جایگزینی مخازن کامپوزیتی نوع 4 با مخازن گاز طبیعی متراکم فلزی نوع یک در سطح کشور است [13]. پیش از این، بررسی استحکام و بهینه‌سازی مخازن کامپوزیتی سوخت گاز طبیعی متراکم از جایگاه ویژه‌ای در طراحی و توسعه این مخازن برخوردار است و در این میان، مؤلفه‌های تعیین زاویه پیچش الیاف و تاثیر وزن و ضخامت از جمله مهمترین عوامل تاثیرگذار در استحکام نهایی مخزن کامپوزیتی و هزینه‌های ساخت و طراحی آن محسوب می‌شوند [14]. بنابراین انجام مطالعات تفصیلی و تجربی در این زمینه می‌تواند نقش مهمی در دستیابی به ضریب اطمینان قابل قبول در استفاده هرچه بیشتر و بهتر مخازن کامپوزیتی داشته باشد. این پژوهش از جمله نخستین مطالعات تفصیلی و تجربی انجام شده برای طراحی بهینه و استفاده ایمن از مخازن نوظهور کامپوزیتی نوع 4 در سطح کشور است که میزان استحکام نهایی شکست مخزن کامپوزیتی در حالت طراحی با ضخامت متغیر و متناسب با شرایط واقعی ساخت مخزن را بررسی نموده است. جهت دستیابی به این هدف 4 مرحله زیر طی شده است: (1) طراحی مخزن در نرم افزار المان محدود انسیس ورک‌بنچ؛ (2) تعیین ناحیه بحرانی و تعیین مخرب‌ترین مؤلفه تنش (3) تکرار شبیه‌سازی برای زوایای مختلف پیچش الیاف در هر دو حالت طراحی با ضخامت ثابت و متغیر (4) انجام آزمون‌های تجربی مطابق با الزامات استاندارد UNECE R 110: 2016.

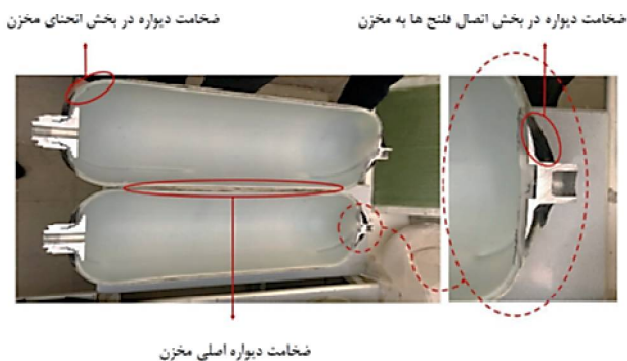
2- مبانی و روش‌ها

2-1- شبیه‌سازی المان محدود

در این پژوهش از یک مخزن سوخت گاز طبیعی متراکم برای یک خودروی سواری سبک با ظرفیت 34 لیتر استفاده شده است. شماتیکی از هندسه و ابعاد مخزن بر حسب میلی‌متر در شکل 1 نشان داده شده است. نمونه مخازن مورد استفاده در این پژوهش از جمله مخازن پرکاربرد بوده که از شرکت تولیدی و صنعتی راد صانع آتی تهیه شده است.

در این مطالعه دو مدل طراحی مخزن شامل ضخامت ثابت و

مکانیکی دیگر مواد مورد استفاده در شبیه‌سازی المان محدود (گزارش شده در جدول 2)، با استفاده از مدل میکرومکانیک و قانون اختلاط در کامپوزیت‌ها با در نظر گرفتن درصد حجمی الیاف 50% بدست آمده است [18، 19]. الیاف شیشه مورد استفاده از نوع دسته الیاف شیشه نتابیده (دوک نخ) با مشخصات E-glass و تکس 2400 بوده که به همراه رزین اپوکسی UN3082 و هاردنر UN2735 از شرکت آمریکایی Fyfe CO تهیه شده است.



شکل 3 ضخامت دیواره پوسته کامپوزیتی در بخش‌های مختلف مخزن برش خورده

Fig. 2 Wall-thickness of the composite shell in the different parts of the sheared tank

جدول 1 خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 7075 [17]

Table 1 Mechanical properties of Al 7075-T6

پارامتر	علامت	واحد	مقدار
استحکام نهایی کشش	σ_{ut}	MPa	572
استحکام تسلیم کششی	σ_{yt}	MPa	503
مدول الاستیک	E	GPa	71/7
مدول برشی	G	GPa	26/9
ضریب پواسون	ν	-----	0/33
حد دوام خستگی	σ_f	MPa	159

جدول 2 خواص مکانیکی مواد اورتوتروپیک [18، 19].

Table 2 Mechanical properties of orthotropic materials

پارامتر	علامت	واحد	کامپوزیت اپوکسی/شیشه	پلی اتیلن
مدول کششی در راستای طولی	E_{11}	GPa	35	0/9
مدول کششی در راستای عرضی	E_{22}	GPa	3/5	0/9
مدول برشی	G_{12}	GPa	4/6	0/312
ضریب پواسون	ν_{12}	---	0/26	0/45

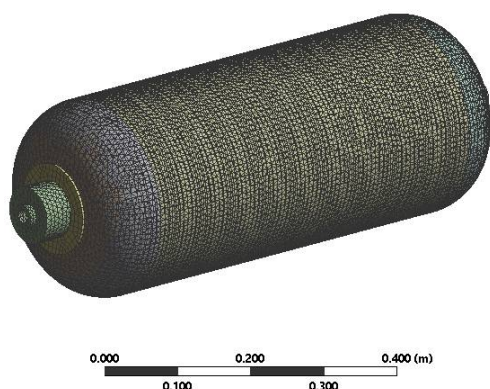
جدول 3 نیز استحکام کششی و برشی ماده کامپوزیتی در مخزن

به منظور طراحی مخزن با ضخامت متغیر از نتایج مطالعه انجام شده توسط نوری و همکاران استفاده شده است [15]. بدین صورت که هندسه مورد نظر بصورت 8 قسمت مجزا مدل‌سازی شده است و سپس با مونتاژ نمودن آن‌ها به یکدیگر، مدل نهایی مخزن ساخته شده است. ضخامت پوسته‌های کامپوزیتی مطابق با اندازه‌گیری انجام شده از مخزن واقعی برای قسمت‌های اصلی، انحنای بالا و پایین و پوسته فلنج بالا و پایین به ترتیب برابر با 3/3، 4/4 و 11 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در شکل 3 نمای کلی از قسمت‌های تغییر ضخامت یافته در مخزن مورد مطالعه نشان داده شده است.

به منظور شبیه‌سازی المان محدود کامپوزیت لایه‌ای در هر دو حالت طراحی مخزن شامل ضخامت ثابت و ضخامت متغیر، ضخامت هر یک از لایه‌ها یکسان و برابر با 0/55 میلی‌متر در نظر گرفته شد (این مقدار بر اساس پارامترهای مختلف اعم از ضخامت الیاف و ... بدست آمده است). همچنین زاویه پیمش الیاف مطابق با داده‌های خط تولید برابر با 17 درجه لحاظ شد [16]. بنابراین شبیه‌سازی المان محدود قسمت ضخامت بدنه کامپوزیتی بصورت چیدمان الیاف $\pm 17^\circ$ اعمال شد. در مدل المان محدود ارایه شده، ضخامت لایه‌ها در راستای Z است، به طوری که اولین لایه دارای کمترین مقدار Z و بیرونی‌ترین لایه دارای بیشترین مقدار Z است. چسبندگی بین لایه‌های کامپوزیت و همچنین چسبندگی بین الیاف و ماتریس بصورت 100% فرض شد. به عبارت دیگر، در حین بارگذاری امکان ایجاد آسیب جدایش بین لایه‌ای و جدایش بین الیاف و ماتریس وجود ندارد. علاوه بر این، یکی دیگر از فرضیه‌های در نظر گرفته شده در مدل المان محدود ارایه شده در این پژوهش، چسبندگی کامل بین قسمت‌های مختلف شامل بدنه کامپوزیتی و لاینر، لاینر و فلنج‌ها و فلنج‌ها و بدنه کامپوزیتی است. بدین ترتیب که در طی دوره سرویس دهی مخزن جدایشی بین متعلقات تشکیل دهنده آن رخ نخواهد داد. همچنین دو طرف مخزن (فلنج‌های بالایی و پایینی) مقید شده‌اند و حرکت آن‌ها در تمامی جهات برابر با صفر در نظر گرفته شد.

بر اساس قسمت‌های مختلف تشکیل دهنده مخزن سوخت گاز طبیعی متراکم تمام کامپوزیتی (نوع 4)، سه نوع ماده مختلف شامل آلومینیوم، پلی اتیلن و کامپوزیت لایه‌ای اپوکسی/شیشه به ترتیب به فلنج‌ها، لاینر و بدنه خارجی مخزن اختصاص داده شد. آلیاژ آلومینیوم 7075 (جدول 1) [17] بصورت یک ماده همگن و ایزوتروپ الاستیک در نرم افزار المان محدود انسیس ورک‌بنچ تعریف شد. علاوه بر این، خواص

به عبارت دیگر با ریزتر نمودن اندازه مش، کیفیت مش‌ریزی نه تنها افزایش نمی‌یابد بلکه به دلیل وجود خطاهای محاسباتی کاهش نیز پیدا می‌کند. لذا در قسمت الف از شکل 4 به وضوح مشهود است که بهترین کیفیت مش‌ریزی (قله منحنی) مربوط به اندازه مش برابر با 8 میلی‌متر است. این روند را می‌توان در قسمت ب از شکل 4 نیز مشاهده نمود. در نهایت، بهترین کیفیت مش برای مدل هندسی مخزن مرتبط با اندازه مش برابر با 8 میلی‌متر و تعداد 91622 المان مطابق با شکل 5 بدست آمد.



شکل 5 مدل المان محدود مخزن سوخت CNG با تعداد 91622 المان

Fig. 5 The FE model of the CNG fuel tank with 91622 elements

2-2- روش آزمون

مطابق با بند پ-9-3 استاندارد UNECE R 110: 2016 تجزیه و تحلیل تنش در مخازن کامپوزیتی نوع 4 می‌تواند در 4 سطح فشار پوسته داخلی صفر مگاپاسکال، فشار کاری، فشار آزمون و فشار طراحی ترکیبگی انجام شود. هدف اصلی از پژوهش حاضر، مطالعه مخزن در فشار طراحی ترکیبگی است. از این رو، باید یک مخزن مطابق با بند پ-12-12 استاندارد به طور هیدرواستاتیک تا حد ترکیدن تحت فشار قرار داده و ضمن رعایت کمینه فشار ترکیدن (45 مگاپاسکال)، فشار ترکیبگی ثبت گردد.

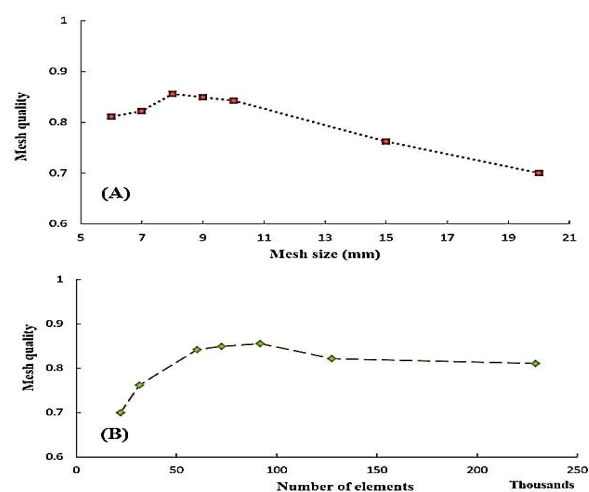
در این مطالعه سعی شده است تا زاویه پیش‌الیف تحت فشار ترکیدن بهینه گردد به طوری که کمترین تنش معادل میسر در مخزن ایجاد گردد. روش تجزیه و تحلیل تنش معادل فون میسر یکی از روش‌های پرکاربرد، کم هزینه و سریع جهت شناسایی نواحی بحرانی و مستعد به شکست به شمار می‌رود [15، 21-23]. نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمون تجربی مخزن تحت فشار داخلی مطابق با پروتکل استاندارد مقایسه شد. پس از تعیین ناحیه بحرانی و همچنین تعیین مخرب‌ترین مؤلفه تنش با استفاده از تکرار شبیه‌سازی برای زوایای مختلف الیف، زاویه

سوخت گاز طبیعی متراکم تمام کامپوزیتی را نشان می‌دهد. به منظور شبکه بندی مدل از دو نوع المان پوسته و جامد به ترتیب برای قسمت‌های بدنه کامپوزیتی و دیگر قسمت‌های مخزن شامل دو فلنج بالا و پایین و لاینر استفاده شده است. برای اتصال المان‌های پوسته و جامد در مدل‌سازی از روش MPC جهت کاهش خطا در همپوشانی قسمت‌های مختلف طراحی استفاده شده است (جزئیات اجرای روش MPC در مرجع [20] ذکر شده است). در ادامه به منظور کاهش هزینه‌های محاسباتی شامل زمان حل المان محدود، ظرفیت کامپیوتر مورد نظر (حافظه و رم) و قدرت سی پی یو و ...، کیفیت مش‌بندی مورد مطالعه قرار گرفت تا بتوان با کمترین تعداد المان و با دقت قابل قبول به شبیه‌سازی المان محدود پرداخت. با بکارگیری امکانات و ماژول‌های نرم افزار انسیس ورک‌بنچ، نمودارهای کیفیت مش بر حسب تعداد المان و اندازه مش مطابق با شکل 4 استخراج شد. در قسمت الف از این شکل مشخص است که با کاهش اندازه المان، کیفیت مش‌ریزی نیز افزایش می‌یابد. با این وجود بین پارامتر اندازه مش و کیفیت مش‌ریزی یک رابطه خطی و دایمی مشاهده نمی‌شود.

جدول 3 استحکام کششی و برشی ماده کامپوزیتی با ضخامت‌های مختلف [15].

Table 3 Tensile and shear strength of composite material with different thicknesses

تعداد لایه	ضخامت کامپوزیت (mm)	استحکام (MPa)	
		کششی	برشی
		بارگذاری طولی	بارگذاری عرضی (XY)
20	11	132/1818	129/4545
8	4/4	53/4545	53/0909
6	3/3	40	39/6363



شکل 4 نمودارهای کیفیت مش بر حسب (A) اندازه مش، (B) تعداد المان

Fig. 4 Mesh quality diagrams A) mesh size and B) number of elements

بهینه برای هر دو حالت طراحی با ضخامت ثابت و متغیر به منظور بهبود استحکام نهایی مخزن بدست آمد.

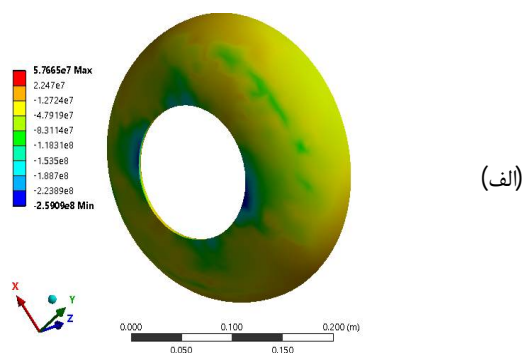
3- نتایج

3-1- تحلیل تنش در مخزن با ضخامت ثابت

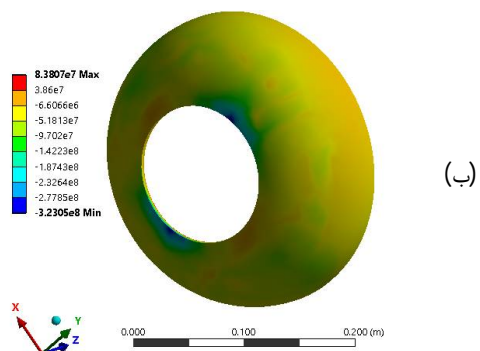
کانتور تنش معادل فون میسز ایجاد شده در مخزن با در نظر گرفتن ضخامت ثابت در شکل 6 نشان داده شده است.

همان‌طور که از شکل 6 مشخص است، بیشترین تنش معادل فون میسز در قسمت فلنج پایین و اتصال بین بدنه کامپوزیتی با فلنج رخ داده است و مقدار آن در حدود 335 مگاپاسکال است. از آنجا که این مقدار نزدیک به استحکام نهایی کامپوزیت لایه‌ای اپوکسی/شیشه با چیدمان مورد نظر است، لذا مخزن از قسمت پوسته کامپوزیتی و در ناحیه فلنج پایینی دچار شکست می‌شود و جدایش فلنج پایین از مخزن رخ می‌دهد. به منظور تعیین مخرب‌ترین مؤلفه تنش، به استخراج کانتورهای انواع تنش (نرمال و برشی) در جهات مختلف در این قسمت از مخزن مطابق با شکل 7 پرداخته شده است.

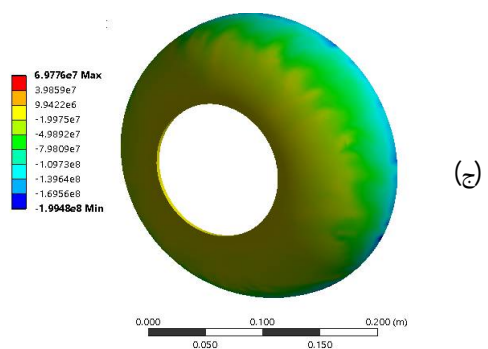
با توجه به کانتورهای ارائه شده در شکل 7 به وضوح مشخص است که بیشینه تنش مثبت مربوط به مؤلفه تنش برشی در صفحه XY (قسمت د از شکل 7) است و همچنین بیشینه تنش فشاری مربوط به مؤلفه‌های تنش‌های نرمال به ترتیب در راستاهای X و Y مرتبط با کانتورهای ب و الف از این شکل است. از طرف دیگر، همواره استحکام فشاری کامپوزیت‌ها به مراتب خیلی کمتر از استحکام کششی کامپوزیت‌ها است. از این رو، بیشترین آسیب وارده به بدنه مخزن و به عبارت دیگر مخرب‌ترین مؤلفه تنش، تنش نرمال در راستای Y مطابق با کانتور تنش ارائه شده در شکل 7 است.



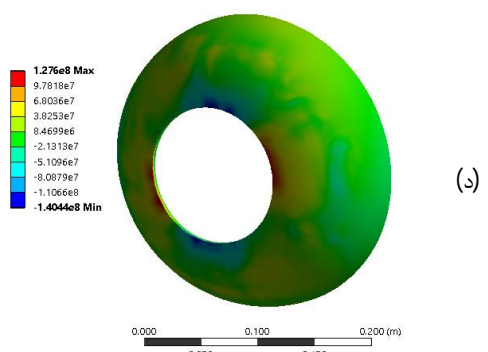
(الف)



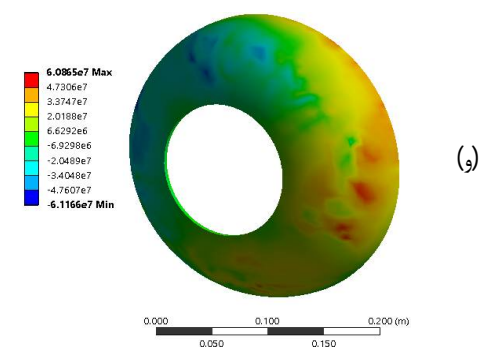
(ب)



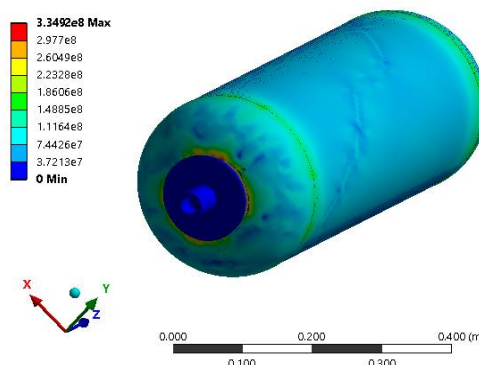
(ج)



(د)



(ه)



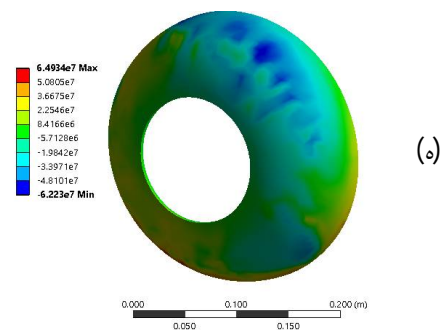
شکل 6 کانتور تنش معادل فون میسز ایجاد شده در مخزن با ضخامت ثابت تحت فشار ترکیند

Fig. 6 Contours of the equivalent Von Mises stress created in the tank under bursting pressure

با توجه به جدول 4 (نتایج استخراج شده از شبیه‌سازی المان محدود) مشخص است که کمینه تنش فون میسر بدست آمده در زاویه 23 درجه خواهد بود. همچنین بیشینه تنش معادل فون میسر متناظر با زاویه بهینه بدست آمده منجر به کاهش 18/39 درصدی تنش نسبت به نتایج بدست آمده از تحلیل المان محدود برای زاویه پیچش 17 درجه با ضخامت ثابت 4/4 میلی‌متر می‌باشد.

نتایج این مطالعه در تعیین زاویه بهینه پیچش الیاف در حالت طراحی مخزن با ضخامت ثابت با نتایج سایر مطالعات مشابه قابل مقایسه است. دیناروندی و مظفری [3] زاویه بهینه پیچش الیاف در مخزن تحت فشار کامپوزیتی نوع 4 برابر با 45 درجه گزارش نمودند. فرهود و همکاران [11] مقدار زاویه بهینه پیچش الیاف در مخازن کامپوزیتی با ضخامت ثابت را برابر با 15 درجه و فشار ترکیبگی برابر با 550 بار را بدست آوردند. مقدار زاویه بهینه پیچش الیاف در مخزن کامپوزیتی اپوکسی-شیشه توسط صرافان و همکاران [4] در محدوده 50 تا 60 درجه گزارش شده است. در مطالعه انجام شده توسط اوندرو و همکاران در سال 2009 نیز مقدار زاویه بهینه پیچش الیاف برابر با 55 درجه بدست آمده است [5]. متغیرهای مختلفی مانند محدودیت‌های تجربی در پیچش الیاف، نوع الیاف و رزین مورد استفاده، نوع مخزن مورد مطالعه، نحوه پیچش و تعداد لایه‌های الیاف، نوع تجهیز مورد استفاده و شرایط آزمایشگاه (کالیبره بودن تجهیزات)، در نظر گرفتن شرایط بهینه در ساخت و طراحی توسط تولیدکنندگان و سایر عوامل تاثیرگذار می‌توانند در اختلاف میان زاویه بهینه پیچش الیاف بدست آمده در مطالعات مختلف نقش داشته باشند [15، 24].

به منظور صحت‌گذاری نتایج عددی در بخش طراحی مخزن با ضخامت ثابت یک عدد نمونه مخزن با ضخامت ثابت 4/4 میلی‌متر و زاویه بهینه الیاف 23 درجه مطابق با نتایج به دست آمده از تحلیل عددی ساخته شده است. پس از انجام آزمون فشار ترکیبگی در مخزن کامپوزیتی با ضخامت ثابت در فشار آزمون 675 بار، شکست در مخزن اتفاق افتاده و فلنج آلومینیومی از مخزن جدا و با شتاب زیاد به سمت بیرون پرتاب شده است (شکل 8). این نتایج چندان دور از انتظار نبود؛ چنانکه در بخش تحلیل عددی با ضخامت ثابت نیز ناحیه بحرانی مخزن در بخش اتصال فلنج به مخزن کامپوزیتی تعیین شده بود. لذا جدایش فلنج آلومینیومی در آزمون تجربی ضمن صحت‌گذاری نتایج بخش تحلیل عددی نشان داد که استحکام نهایی مخزن در فشار 675 بار اتفاق افتاده و این موضوع با وجود ضعف در



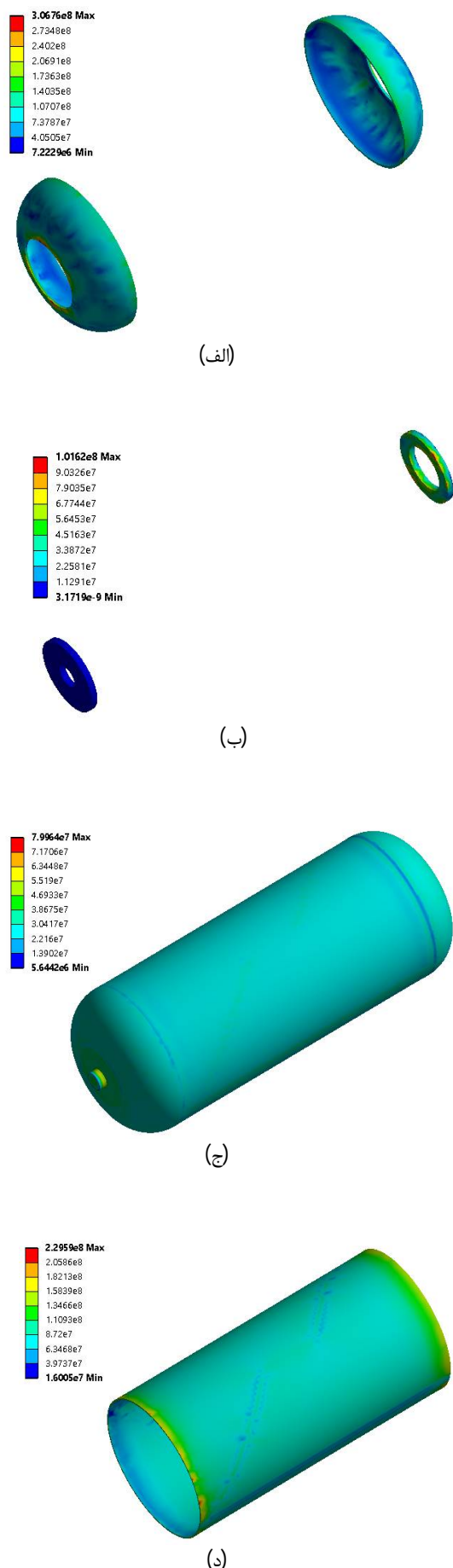
شکل 7 کانتورهای تنش در جهات مختلف در منطقه بحرانی از بدنه مخزن با ضخامت ثابت شامل: الف) تنش نرمال در راستای X، ب) تنش نرمال در راستای Y، ج) تنش نرمال در راستای Z، د) تنش برشی در صفحه XY، و) تنش برشی در صفحه XZ و ه) تنش برشی در صفحه YZ

Fig. 7 Tension contours in different directions in the critical area of the tank body with constant thickness include: a) normal stress in X direction, b) normal stress in Y direction, c) normal stress in Z direction, d) shear stress in XY plane, and e) shear stress in YZ plane

در شکل 7- ب مشخص است که بحرانی‌ترین منطقه در اطراف سوراخ دایروی متصل به فلنج آلومینیومی در هر دو حالت کشش (ناحیه قرمز رنگ) و فشار (ناحیه آبی رنگ) می‌باشد. به عبارت دیگر، ایجاد چنین تنش‌هایی در لبه سوراخ اتصال بدنه کامپوزیتی با فلنج آلومینیومی منجر به ایجاد دفرمگی شدید می‌شود و شکل هندسی سوراخ کامپوزیتی به سمت شکل بیضوی میل می‌کند که از یک سمت کشیدگی و از سمت دیگر فشردگی در آن بوجود آمده و در نهایت منجر به جدایش لایه‌های کامپوزیت از سطح فلنج آلومینیومی می‌گردد. پس از تعیین ناحیه بحرانی و همچنین تعیین مخرب‌ترین مؤلفه تنش، زوایای پیچش مختلف الیاف در راستای بهبود استحکام نهایی مخزن، مورد بررسی قرار گرفت و نتایج بدست آمده در جدول 4 گزارش گردید.

جدول 4 نتایج شبیه‌سازی المان محدود برای زوایای پیچش الیاف مختلف
Table 4 The results obtained from finite element simulations for different fiber twisting angles

شماره شبیه‌سازی	زاویه پیچش الیاف شیشه	بیشینه مقدار تنش معادل فون میسر (مگاپاسکال)
1	11	395/54
2	13	370/63
3	15	346/75
4	17	334/92
5	19	314/83
6	21	295/55
7	23	273/32
8	25	304/71
9	27	353/31
10	29	382/44



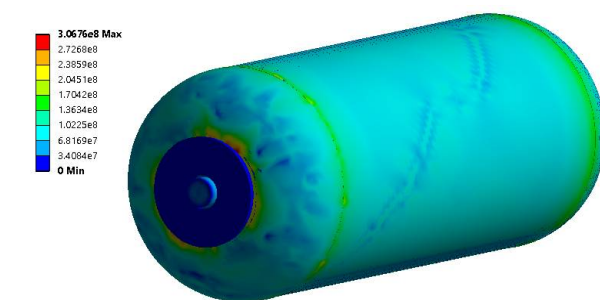
اتصال فلنج و مخزن با استفاده از پیچش الیاف در زاویه بهینه، کمینه فشار ترکیدگی (45 مگاپاسکال) را نیز با حدود قابل قبولی رعایت کرده است.

3-2- تحلیل تنش در مخزن با ضخامت متغیر

کانتور تنش معادل فون میسز ایجاد شده در مخزن با در نظر گرفتن ضخامت متغیر در شکل 9 نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل 9 مشخص است، بیشترین تنش معادل فون میسز در ناحیه انحنادار منتهی به فلنج پایینی از مخزن رخ داده و مقدار آن در حدود 306 مگاپاسکال است. از آنجا که این مقدار نزدیک به استحکام نهایی کامپوزیت لایه‌ای اپوکسی/شیشه با چیدمان مورد نظر است، لذا مخزن از قسمت پوسته کامپوزیتی و در ناحیه انحنادار منتهی به فلنج پایینی دچار شکست می‌شود. به منظور تعیین مخرب‌ترین مؤلفه تنش، به استخراج کانتورهای انواع تنش (نرمال و برشی) در جهات مختلف در مخزن مطابق با شکل 10 پرداخته شده است.



شکل 8 ناحیه شکست مخزن با ضخامت ثابت تحت آزمون فشار ترکیدگی
Fig. 8 Tank failure area under bursting pressure test



شکل 9 کانتور تنش معادل فون میسز ایجاد شده در مخزن با ضخامت متغیر تحت فشار ترکیدن

Fig. 9 Contours of the equivalent Von Mises stress created in the tank with variable thickness under bursting pressure

فشار 780 بار در زاویه بهینه 15 درجه در طراحی مخزن با ضخامت متغیر علاوه بر رفع مشکل جدایش فلنج در مخازن کامپوزیتی با ضخامت ثابت منجر به بهبود قابل توجهی در استحکام نهایی مخزن و حدود اطمینان متناسب با استانداردهای بین‌المللی گردیده است.

جدول 5 نتایج شبیه‌سازی المان محدود برای زوایای پیچش الیاف مختلف

Table 5 The results obtained from finite element simulations for different fiber twisting angles

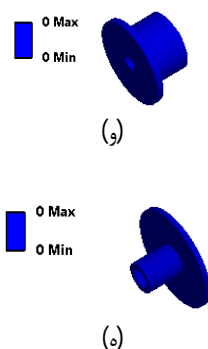
شماره شبیه‌سازی	زاویه پیچش الیاف شیشه	بیشینه مقدار تنش معادل فون میسر (MPa)
1	11	335/21
2	13	310/63
3	15	239/24
4	17	306/72
5	19	318/38
6	21	325/35
7	23	331/12
8	25	339/88
9	27	348/55
10	29	357/69



شکل 11 ناحیه شکست مخزن با ضخامت متغیر تحت آزمون فشار ترکیدگی
Fig. 11 Failure area of the tank with variable thickness under bursting pressure test

4- نتیجه‌گیری

بررسی دو مؤلفه تعیین زاویه بهینه پیچش الیاف و تاثیر ضخامت از جمله مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار در استحکام نهایی و هزینه ساخت و طراحی مخازن کامپوزیتی محسوب می‌شوند [23]. علی‌رغم اهمیت انجام مطالعات تفصیلی در این زمینه، هنوز صنعت خودروسازی کشور با مشکلاتی مانند نشتی، پارگی، شکست و انفجار این مخازن روبرو است که این امر ضرورت بررسی استحکام و بهینه‌سازی مخازن کامپوزیتی سوخت گاز



شکل 10 کانتورهای تنش در قسمت‌های مختلف از مخزن با ضخامت متغیر شامل: الف) کامپوزیت اپوکسی/شیشه با ضخامت 4/4 میلی‌متر، ب) کامپوزیت اپوکسی/شیشه با ضخامت 11 میلی‌متر، ج) لاینر پلی اتیلن، د) کامپوزیت اپوکسی/شیشه با ضخامت 3/3 میلی‌متر، و) فلنج آلومینیومی بالایی و ه) فلنج آلومینیومی پایینی

Fig. 10 Tension contours in different directions in the tank body with variable thickness include: a) Glass/Epoxy composite (thickness of 4.4mm), b) Glass/Epoxy composite (thickness of 11mm), c) Polyethylene liner, d) Glass/Epoxy composite (thickness of 3.3mm), e) Aluminum upper flange and f) Aluminum lower flange

در شکل 10 به وضوح مشخص است که بیشترین مقدار تنش فون میسر در ناحیه انحادار منتهی به فلنج پایینی و در حدفاصل تغییر ضخامت مخزن از 3/3 میلی‌متر به 4/4 میلی‌متر رخ داده و بیشترین تاثیر را مؤلفه تنش برشی در صفحه XY بر روی آن داشته است. بر این اساس، قسمت‌های مربوط به تغییر ضخامت پوسته کامپوزیتی دارای حساسیت بیشتری نسبت به مقاومت در برابر استحکام نهایی مخزن می‌باشند.

نتایج بررسی زوایای پیچش مختلف الیاف در راستای بهبود استحکام نهایی مخزن در جدول 5 ارائه شده است.

نتایج جدول 5 نشان داد که کمینه تنش فون میسر در زاویه پیچش بهینه الیاف 15 درجه خواهد بود. همچنین بیشینه تنش معادل فون میسر متناظر با زاویه بهینه بدست آمده منجر به کاهش 22/01 درصدی تنش نسبت به نتایج بدست آمده از تحلیل المان محدود مطابق با زاویه 17 درجه با ضخامت متغیر می‌باشد.

اعتبارسنجی نتایج بخش عددی در طراحی مخزن با ضخامت متغیر و زاویه بهینه 15 درجه تحت فشار آزمون ترکیدگی مطابق با پروتکل استاندارد انجام شده است (شکل 11). شکست مخزن در ناحیه انحادار منتهی به فلنج پایینی و در حدفاصل تغییر ضخامت مخزن از 3/3 میلی‌متر به 4/4 میلی‌متر اتفاق افتاده است این مهم در حالی است که تعیین ناحیه بحرانی انحادار منتهی به فلنج پایینی در نتایج تحلیل عددی با ضخامت متغیر ضمن تایید صحت گذاری شبیه‌سازی نشان از تطابق بالای نتایج بخش تجربی و عددی دارد. همچنین شکست مخزن در

شرایط آزمون‌های تجربی قدردانی می‌شود. همچنین از جناب آقای مهندس یعقوب پور مدیر عامل محترم شرکت راد صانع آتی به منظور تهیه نمونه‌های آزمون و مشارکت در انجام این پژوهش کمال تشکر را دارد.

6- مراجع

- [1] <http://www.opec.org/library/Annual%20Statistical%20Bulletin/interactive/current/FileZ/Main.htm> Marketed Natural Gas Production. OPEC Statistical Bulletin, 2014.
- [2] M. Nirbhay, S. Juneja, A. Dixit, R. Misra, K. S. Sharma, Finite element analysis of all composite CNG cylinders, *Procedia Materials Science*, Vol. 10, pp. 507-512, 2015.
- [3] P. Dinarvandi, H. Mozaffari, Simulation and study of thermal and mechanical buckling of thin-walled composite tanks under pressure using finite element analysis. *The first annual national conference on mechanical engineering and industrial solutions*, Kerman, Iran, June 12-14, 2015. (in Persian فارسی)
- [4] S. Sarafan, M. Tahani, M. Mirzababaei, M. Sharifi, Optimization of high pressure thick composite wall tanks, *12th National Conference on Manufacturing Engineering*, Tehran, Iran, May 11-13, 2011. (in Persian فارسی)
- [5] Onder, O. Sayman, T. Dogan, N. Tarakcioglu, Burst failure load of composite pressure vessels. *Composite structures*, Vol. 89, pp. 159-166, 2009.
- [6] M. Zohoor, S. Saffar, M. H. Sadafi Tehrani, Design of compact natural gas (CNG) tanks for automobiles, *Majlesi Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 1, pp. 12 56-1267, 2007. (in Persian فارسی)
- [7] M. Heidari Rarani, M. Ahmadi-Jebeli, Finite element modeling of destruction in type IV composite pressure reservoir using WCM extension in ABAQUS software, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, pp. 32-45, 2018. (in Persian فارسی)
- [8] Khani, A. Vafae-Sefat, S. Rahmati, Weight Optimization of a Composite Shell in Type 4 Pressure Vessels by Genetic Algorithm, *Journal of Aerospace Mechanics*, Vol. 2, pp. 458-469, 2006.
- [9] P. M. Patel, J. Rana, Design & Optimization of LNG-CNG Cylinder for Optimum Weight, *International Journal for Scientific Research & Development*, Vol. 1, pp. 256-263, 2013.
- [10] D. S. Son, S.H. Chang, Evaluation of modelling techniques for a type III hydrogen pressure vessel (70MPa) made of an aluminum liner and a thick fiber/epoxy composite for fuel cell vehicles, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, pp. 689-699, 2012.
- [11] Farhood, N. H., Karuppanan, S., Ya, H. H., & Baharom, M. A. (2017, December). Burst pressure investigation of filament wound type IV composite pressure vessel. *In AIP Conference Proceedings* (Vol. 1901, No. 1, p. 030017). AIP Publishing LLC.

طبیعی متراکم را در طراحی و توسعه این مخازن نشان می‌دهد. از این رو در این مطالعه تحلیل تنش یک مخزن سوخت گاز طبیعی متراکم 34 لیتری تمام کامپوزیتی نوع 4 در دو حالت طراحی با ضخامت ثابت و متغیر و نیز تعیین زاویه بهینه پیچش الیاف با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود انجام شد. مهمترین نتایج بدست آمده در این مطالعه را به می‌توان به صورت موارد زیر بیان نمود:

- با توجه به بیشترین تنش معادل فون میسز در ناحیه بحرانی، مخرب‌ترین مؤلفه تنش برای هر دو حالت مختلف طراحی به دست آمد.

- به منظور افزایش مقاومت استحکام نهایی مخزن با استفاده از نتایج حاصل از مطالعه زوایای پیچش مختلف الیاف، بهینه‌ترین زاویه پیچش الیاف برای مخزن با ضخامت ثابت و مخزن با ضخامت متغیر به ترتیب برابر با 23 درجه و 15 درجه مشخص گردید.

- نتایج بخش طراحی با ضخامت متغیر در مقایسه با ضخامت ثابت علاوه بر رفع مشکل جدایش فلنج در آزمون فشار ترکیدگی با ضخامت ثابت نسبت به حالت اولیه ساخت مخزن نشان از بهبود قابل توجه استحکام نهایی و بالاتر از شرایط بیشینه فشار آزمون ترکیدگی مطابق با پروتکل استاندارد (730 بار) است.

- بکارگیری نتایج این پژوهش می‌تواند منجر به افزایش 22/01% استحکام شکست نهایی مخزن تمام کامپوزیتی نوع 4 تولید شده در کارخانه مورد نظر شود.

نتایج حاصل از این مطالعه به دلیل انجام آزمون‌های تجربی در آزمایشگاه‌های دارای صلاحیت استاندارد 17025 در کشور (مجموعه آزمایشگاهی شرکت سیلندر گاز پرشیا) می‌تواند به عنوان مرجعی برای ارزیابی دقت سایر مطالعات مشابه در تعیین زاویه بهینه پیچش الیاف در مخازن کامپوزیتی نوع 4 اپوکسی/شیشه با شرایط یکسان مورد توجه قرار گیرد. با توجه به اینکه این مطالعه از جمله نخستین تلاش‌های صورت گرفته در سطح کشور در زمینه تعیین زاویه بهینه پیچش الیاف در حالت طراحی مخازن گاز طبیعی متراکم کامپوزیتی نوع 4 با ضخامت متغیر می‌باشد، روش تحلیلی به کار رفته می‌تواند به عنوان مبنایی برای سایر مطالعات آینده در زمینه طراحی این مخازن و توسعه تحقیقات آتی مورد استفاده قرار گیرد.

5- سپاسگزاری

از مجموعه آزمایشگاهی سیلندر گاز پرشیا جهت فراهم‌سازی

- compressor impeller blades based on FEA, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 7, pp. 6-11, 2017.
- [19] Amiri Asfarjani, S. Adibnazari, K. Reza Kashyzadeh, Experimental and finite element analysis approach for fatigue of unidirectional fibrous composites, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 87, pp. 1158-1168, 2011.
- [20] ANSYS Inc. ANSYS Contact Technology Guide, ANSYS Release 14.0 Documentation.
- [21] S.B. Zarandi, H.W. Lai, Y.C. Wang, S. Aizikovich, Residual stress analysis of an orthotropic composite cylinder under thermal loading and unloading. *Symmetry*, Vol. 11, No. 3, pp. 320, 2019.
- [22] S. Biradar, S. Joladarashi, S.M. Kulkarni, Analytical and FE analysis of Al 6061 T6 and laminated composite LPG cylinder. *Young*, Vol. 7850, No. 2770, pp. 1590, 2017.
- [23] ISO 11119-3:2013, Gas cylinders -Refillable composite gas cylinders and tubes-Part3: Fully wrapped fibre reinforced composite gas cylinders and tubes up to 450 l with non-load-sharing metallic or non-metallic liners.
- [24] UNECE R 110: 2016, CNG Fuelled vehicles- Specifications and test methods of CNG components and their installation requirements.
- [12] National Standard Organization of Iran, 2020. Official website of the National Standard Organization of Iran (<http://www.isiri.gov.ir>).
- [13] E. Debondue, Glass composite offers benefits for CNG tanks. *Reinforced Plastics*, Vol. 55, No. 5, pp. 32-35, 2011.
- [14] K.R. Kashyzadeh, S.S. Rahimian Kolor, M. Omidi Bidgoli, M. Petrù, A. Amiri Asfarjani, An Optimum Fatigue Design of Polymer Composite Compressed Natural Gas Tank Using Hybrid Finite Element-Response Surface Methods. *Polymers*, Vol. 13, No. 4, 483, 2021.
- [15] M. Nouri, F. Ashenai-Ghasemi, G. Rahimi-Sherbaf, K.R. Kashyzadeh, Experimental and Numerical Study of the Static Performance of a Hoop-Wrapped CNG Composite Cylinder Considering Its Variable Wall Thickness and Polymer Liner. *Mech. Compos. Material*, Vol. 56, pp. 339-352, 2020.
- [16] Rad Sane Atti Industrial Group, High Pressure Full Composite Cylinders Manufacturer (Type IV), 2000.
- [17] E. Ghali, *Uhlig's Corrosion Handbook*, Second Edition, Edited by R. Winston Revie. John Wiley & Sons, 2000.
- [18] K. Reza Kashyzadeh, S. Alipanah Kivi, M. Rynkovskaya, Fatigue life assessment of unidirectional fibrous composite centrifugal