



مدل سازی المان محدود تخریب در مخزن تحت فشار کامپوزیتی نوع IV با استفاده از افزونه WCM در نرم افزار آباکوس

محمد حیدری رارانی^{1*}، محسن احمدی جبلی²

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

2- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

* m.heidarirarani@eng.ui.ac.ir, 8174673441، صندوق پستی

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 21 آذر 1396

پذیرش: 09 اسفند 1396

ارائه در سایت: 19 فروردین 1397

کلید واژگان:

مخزن تحت فشار

پیش الیاف

افزونه WCM

فشار ترکیبگی

امروزه هیدروژن به عنوان یک منبع انرژی سازگار با محیط زیست مورد توجه صنعت حمل و نقل قرار گرفته است. استفاده از مخازن تحت فشار کامپوزیتی نوع IV به دلیل نسبت استحکام به وزن مناسب آن‌ها، راه‌حلی مطمئن برای ذخیره گاز هیدروژن متراکم به شمار می‌آید. مخازن تحت فشار کامپوزیتی نوع IV از سه بخش اصلی، لاینر پلیمری، فلنج فلزی و پوسته کامپوزیتی الیاف کربن/اپوکسی تشکیل شده‌اند. در ناحیه عدسی‌های این مخازن به دلیل کاهش شعاع و تجمع رزین، ضخامت لایه‌های کامپوزیتی و زاویه الیاف افزایش می‌یابد و این امر مدل‌سازی این نواحی را در این مخازن به جدی‌ترین چالش تبدیل کرده است. افزونه WCM به منظور شبیه‌سازی المان محدود متقارن محوری یا سه‌بعدی مخازن تحت فشار کامپوزیتی نوع III و IV، برای نرم‌افزار آباکوس ارائه شده است. در این افزونه علاوه بر کمیت‌هایی چون ضخامت لایه‌ها و زاویه الیاف می‌توان کمیت‌های ساختی چون پهنای باند، زاویه انتقال و بخش پایانی را نیز تعیین کرد تا مدل‌سازی دقیق‌تری حاصل شود. در این پژوهش، مخزن تحت فشار کامپوزیتی نوع IV با حجم داخلی دو لیتر، توسط افزونه WCM در نرم‌افزار آباکوس مدل شده است. مقایسه نتایج عددی حاصل از این مدل‌سازی با نتایج تجربی و شبیه‌سازی‌های موجود در مقالات، دقت قابل قبول این مدل‌سازی را نشان می‌دهد. همچنین در این پژوهش، پس از استخراج تنش‌های راستای اصلی ماده و کد نویسی روابط حاکم بر معیارهای شکست مواد کامپوزیتی چون تسای-هیل، تسای-وو و هشین، فشار تخریب مخزن پیش‌بینی شده است که در پژوهش‌های دیگر به آن پرداخته نشده است.

Finite element modeling of failure in IV type composite pressure vessel using WCM plug-in in ABAQUS software

Mohammad Heidari-Rarani*, Mohsen Ahmadi-Jebeli

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

* P.O.B. 8174673441 Isfahan, Iran, m.heidarirarani@eng.ui.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 12 December 2017
Accepted 28 February 2018
Available Online 08 April 2018

Keywords:
Pressure vessel
Filament winding
WCM plug-in
Burst pressure

ABSTRACT

Hydrogen has become an attractive source of energy for transportation industry, which is adaptable to the environment. Using composite pressure vessel type IV for storing compressed hydrogen gas seems to be a safety solution because of their ratio of strength to weight. Type IV composite pressure vessels consist of three main parts of polymeric liner, metallic boss and carbon fiber/epoxy composite shell. In the dome zones of these vessels, the thickness of composite layers and the fiber angle would increase because of accumulation of resin and reduction in radius. This issue is caused the modeling of these vessels to be a serious challenge. The WCM plug-in is presented for simulation of axisymmetric or three-dimensional composite pressure vessels type III and IV in ABAQUS software. In addition to the parameters like layer thicknesses and fiber angles, manufacturing parameters such as bandwidth, transition angle and end fraction could be also defined in this plug-in in order to achieve more accurate results. In this study, a type IV high pressure composite vessel with inner volume of two liters is modeled using the WCM plug-in in ABAQUS software. Numerical results are assessed by the available experimental results in the literature. Moreover, failure pressure of this vessel has been estimated by calculating the on-axis stresses and using failure criteria such as Tsai-Hill, Tsai-Wu and Hashin which is not done in other investigations.

1- مقدمه

عنوان محصول جانبی و مقدار بسیار کمی ترکیبات نیتروژنی تولید می‌گردد [2]. وسایل نقلیه با سوخت هیدروژنی، ویژگی‌هایی از خود نشان می‌دهند که آن‌ها را به عنوان نامزد اصلی برای جایگزینی با وسایل نقلیه‌ای با سوخت پایه نفتی امروزی، تبدیل می‌کند. از تکنولوژی‌های مختلفی چون گاز هیدروژن

در سال‌های اخیر هیدروژن به عنوان یک منبع انرژی سازگار با محیط‌زیست با منابع زیاد، در صنایع حمل و نقل مورد توجه واقع شده و نحوه ذخیره آن تحت بررسی دقیق، قرار گرفته است [1]. در واقع با سوختن هیدروژن، آب به

Please cite this article using:

M. Heidari-Rarani, M. Ahmadi-Jebeli, Finite element modeling of failure in IV type composite pressure vessel using WCM plug-in in ABAQUS software, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 04, pp. 191-200, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

می شوند. البته در این روش فقط تنش در ناحیه استوانه‌ای بدست می آید. با توجه به تأثیر هندسه عدسی بر روی تنش‌ها در ناحیه عدسی‌ها، با استفاده از این روش هندسه‌ای بهینه نسبت به هندسه‌های بیضوی و کروی برای ناحیه عدسی‌ها با نام هندسه ژئودزیک⁹ بدست می آید که در آن تغییرات کرنش در راستای الیاف در امتداد عدسی‌ها ناچیز است [10-13].

برای فهم بهتر تنش در ناحیه عدسی‌ها، از روش تحلیل المان محدود¹⁰ استفاده می شود. هندسه و ماده دو ورودی مهم در این روش هستند. در این مخازن، ضخامت لایه‌ها در ناحیه عدسی‌ها به دلیل کاهش شعاع و نیز انباشته شدن رزین، همواره تغییر می کند که این امر باعث تغییر هندسه مخزن در این ناحیه‌ها می شود. همچنین، به دلیل انحنا موجود در ناحیه عدسی‌ها، الیاف در این ناحیه با تغییر زاویه پیچش روبرو خواهند شد که این تغییر زاویه موجب تغییر خواص در هر المان می شود [11].

برای استفاده از روش تحلیل شبکه‌ای و المان محدود در نرم افزارهای تحلیلی چون آباکوس¹¹ و انسیس¹²، اقدام به کدنویسی موردی روابط این روش‌ها و استفاده دستی از آن‌ها در این نرم افزارها می شد و پس از آن، این روابط به صورت کدهای آماده اتوماتیک و نیمه اتوماتیک به نرم افزارها اضافه و توسعه داده شد (مانند افزونه WCM¹³ که به منظور طراحی مخازن کامپوزیتی برای نرم افزار آباکوس توسعه یافته است).

ده و هانگ در سال 1995 [14]، با استفاده از مدل آسیب پیشرونده‌ای که در آن با فرض هندسه غیر خطی به تحلیل المان به المان ساختار می پردازد، به پیش بینی استحکام مخازن تحت فشار کامپوزیتی الیاف کربن/اپوکسی پرداختند. ایشان در این پژوهش با استفاده از روش المان محدود غیر خطی و تحلیل آسیب پیشرونده به جای تحلیل شبکه‌ای، روابطی را استخراج کردند که در آن‌ها تغییر شکل‌ها و چرخش‌های بزرگ در نظر گرفته می شد. در این پژوهش، فشار ترکیدگی با کاهش خواص مکانیک لایه تخریب شده در هر مرحله و محاسبه دوباره زمینه سختی کل، پیش بینی شده است.

اسیا و همکارانش در سال 2001 [15,16]، به بررسی اثرات ترکیبی ترمومکانیک و فشار داخلی و نیز استخراج روابط تنش برای مخزن کامپوزیت پیچیده شده چندلایه با استفاده از نظریه کلاسیک لایه‌ای¹⁴ پرداختند.

گری و موزر در سال 2004 [11]، به بیان روش‌های تحلیلی مورد استفاده در طراحی مخازن تحت فشار کامپوزیتی تولید شده به روش پیچش الیاف مانند روش تحلیل شبکه‌ای پرداخته و با استفاده از آن‌ها اقدام به توسعه زیربرنامه‌ها¹⁵ در نرم افزار المان محدود آباکوس کردند.

سارکار و بنرجو در سال 2005 [17]، با استفاده از روش آنالیز انرژی شبکه‌ای به مقایسه روش‌های مختلف ذخیره سازی هیدروژن پرداخته و دریافتند که گاز هیدروژن متراکم نسبت به سایر روش‌های ذخیره سازی در میزان انرژی مصرفی بهینه تر است.

کتیا و هرو در سال 2006 [5]، به مرور فنی و تاریخچه‌ای مخازن تحت فشار هیدروژن پرداخته و مسایل ویژه و محدودیت‌های استفاده از انرژی هیدروژن را شرح دادند.

ویلاردسون و همکارانش در سال 2009 [10]، به مقایسه و معرفی روش‌های سنتی چون تحلیل شبکه‌ای و تحلیل المان محدود پرداختند. به

متراکم¹، جذب سطحی هیدروکسید فلزات² و هیدروژن مایع برودتی³ برای ذخیره سازی سوخت هیدروژن استفاده می شود که گاز هیدروژن متراکم نسبت به سایر روش‌های ذخیره سازی در میزان انرژی مصرفی بهینه تر است [4,3]. امروزه برای ذخیره سازی هیدروژن به منظور استفاده از آن به عنوان سلول‌های سوختی در وسایل نقلیه و حتی در سفینه‌ها، از مخازن تحت فشار استفاده می شود.

مخازن تحت فشار از نظر جنس، به چهار نوع تقسیم می شوند:

(1) نوع I: تمام فلزی

(2) نوع II: لاینر فلزی تقویت شده با کامپوزیت در قسمت استوانه به صورت حلقوی⁴

(3) نوع III: لاینر فلزی تقویت شده با کامپوزیت

(4) نوع IV: لاینر پلیمری تقویت شده با کامپوزیت

برای ذخیره گاز هیدروژن از مخازن تحت فشار کامپوزیتی⁵ نوع IV به دلیل ویژگی‌های منحصربفردشان مانند سبک تر بودن، به عنوان راه‌حلی مطمئن استفاده می شود. این مخازن از لاینر پلیمری، فلنج‌های فلزی و پوسته کامپوزیتی الیاف کربن/اپوکسی تشکیل و به روش پیچش الیاف⁶ تولید می شوند. فرایند پیچش الیاف به یک روش محبوب در طیف گسترده‌ای از صنایع برای ایجاد ساختارهایی با نسبت استحکام به وزن بسیار بالا تبدیل شده است. در واقع، مخازن تحت فشار کامپوزیتی نوع IV، دارای ساختاری با نسبت استحکام به وزن بسیار بالا می باشند که این ساختار ضمن کاهش وزن مخزن منجر به افزایش فشار ترکیدگی⁷ آن نیز می شود و این امر آن‌ها را برای استفاده در صنایع هوا فضا مناسب می کند. به منظور افزایش کارایی این مخازن برای استفاده بر روی وسایل نقلیه، از آن‌ها در فشارهای بالای 35 MPa و تا 70 MPa استفاده می شود. کامپوزیت‌های الیاف کربن/اپوکسی بیش از پیش به منظور توسعه مخازن ذخیره سازی هیدروژن تحت فشار سبک در حوزه سلول سوخت هیدروژن خودرو، به دلیل مزایای زیادی چون نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت به خوردگی و خستگی عالی مورد استفاده قرار گرفته‌اند توسعه‌های کنونی بر روی مخازن تحت فشار کامپوزیتی نوع IV با فشار کاری بالا (70 MPa)، نتایج قابل قبولی (در فشار ترکیدگی، مقاومت به چرخه بالا و غیره) را نشان داده است [1,9-4]. استفاده از این مخازن در برنامه‌های کاربردی صنعت هوا-فضا، شامل مخازن سوخت موشک و محفظه موتورهای موشک سوخت جامد و در برنامه‌های کاربردی صنعت خودرو شامل مخازن ذخیره سوخت در فشار بالا برای خودروهای هیدروژنی، می شود [9,6]. بنابراین تحلیل اجزاء محدود مخازن تحت فشار کامپوزیتی نوع IV ساخته شده به روش پیچش الیاف، از اهمیت بخصوصی در طراحی این مخازن برخوردار شده است.

تحلیل شبکه‌ای⁸، روشی ساده و سنتی در طراحی این مخازن به شمار می آید که در آن طرح مناسب، با استفاده از تکرار و سعی و خطا حاصل می شود. بنابراین استفاده از این روش تحلیلی نیاز به تجربه بالا دارد. در این روش، با صرف نظر کردن از سهم رزین در استحکام کامپوزیت فرض می شود که تمام بار اعمالی فقط توسط الیاف تحمل خواهد شد و با این فرض ضخامت مورد نیاز ناحیه استوانه‌ای و عدسی‌ها و در نتیجه تنش‌ها محاسبه

⁹ Geodesic

¹⁰ Finite Element Analysis (FEA)

¹¹ ABAQUS

¹² ANSYS

¹³ Wound Composite Modeler plug-in

¹⁴ Classical Laminate Theory

¹⁵ User Subroutines

¹ Compressed Hydrogen Gas (CH₂)

² Metal Hydride Absorption

³ Cryogenic Liquid Hydrogen (LH₂)

⁴ Hoop

⁵ Composite Overwrapped Pressure Vessels (COPVs)

⁶ Filament Winding

⁷ Burst Pressure

⁸ Netting Analysis

به دست آمده با نتایج تجربی موجود در مراجع مقایسه شده است. همچنین، با استخراج تنش‌های راستای اصلی ماده از نرم افزار آباکوس و کدنویسی روابط حاکم بر معیارهای شکست مواد کامپوزیتی چون تسای-هیل⁵، تسای-وو⁶ و هشین⁷، فشار ترکیدگی مخزن پیش‌بینی شده است که در پژوهش‌های دیگر به آن پرداخته نشده است.

2- مدل سازی اجزاء محدود

2-1- بیان مسأله

همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده است، هر مخزن تحت فشار کامپوزیتی نوع IV، از سه بخش اصلی تشکیل شده است:

- 1) لاینر پلیمری که علاوه بر وظیفه انتقال فشار داخلی مخزن به پوسته کامپوزیتی، وظیفه تثبیت‌کنندگی چقرمگی⁸ کل سازه را نیز دارا می‌باشد.
- 2) فلنج‌های فلزی که برای اتصال مخزن به وسایل دیگر مانند دستگاه سوخت‌گیری تعبیه می‌شود.
- 3) پوسته کامپوزیتی که وظیفه تحمل فشار را دارد.

مهم‌ترین ویژگی مخزن تحت فشار کامپوزیتی نوع IV ساخته شده به روش پیچش الیاف، نسبت استحکام به وزن بسیار بالای آن‌ها می‌باشد که موجب افزایش فشار ترکیدگی در عین کاهش وزن کلی سازه خواهد شد و این امر، آن‌ها را برای استفاده در صنایعی چون صنایع هوا-فضا، که در آن‌ها وزن کلی سازه از کمیت‌های اصلی طراحی است، مناسب می‌کند. از این‌رو، مدل‌سازی و تحلیل دقیق اجزاء محدود مخزن تحت فشار کامپوزیتی نوع IV ساخته شده به روش پیچش الیاف، از اهمیت بخصوصی برخوردار است. ساختار این مخزن تحت فشار کامپوزیتی، پیچیده است؛ زیرا:

- 1) آن‌ها دارای ساختار چندلایه‌ای متشکل از چندین ماده با تعداد زیادی سطح مشترک هستند.
- 2) چینش لایه‌ها در این مخزن پیچیده هستند (چینش لایه‌ها با زوایای پیچش مختلف از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند).
- 3) هندسه عدسی آن‌ها، وابسته به تغییرات ضخامت (ناشی از کاهش شعاع و انباشته شدن رزین) و زاویه هر لایه و نیز ترتیب قرارگیری آن‌ها در ناحیه استوانه‌ای می‌باشد.

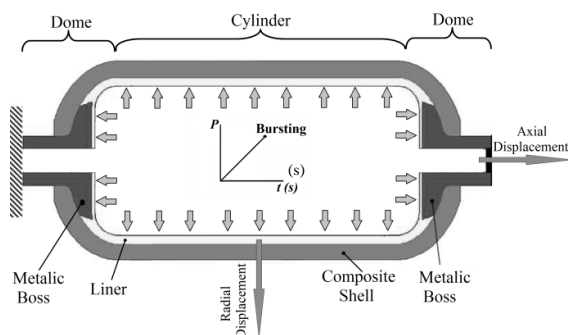


Fig. 1 Composite Overwrapped Pressure Vessel type IV

شکل 1 مخزن تحت فشار کامپوزیتی نوع 4

علاوه در این پژوهش، به معرفی ابزاری تجاری برای نرم افزار تحلیل المان محدود آباکوس، در زمینه تحلیل و طراحی مخازن تحت فشار کامپوزیتی با نام WCM پرداخته شده است.

توماس در سال 2011 [18]، در رساله دکترای خود، به بررسی کامپوزیت‌ها، روش‌های تولید آن‌ها بخصوص روش پیچش الیاف و شکست در مخازن تحت فشار کامپوزیتی نوع IV دو لیتری، پرداخت. به علاوه او در این پژوهش با استفاده از نتایج آزمایش‌های تجربی، خواص ماکرومکانیکی کامپوزیت الیاف کربن/اپوکسی را نیز استخراج کرد.

روه و همکارانش در سال 2013 [19]، به بهینه‌سازی کمیت‌های مربوط به پیچش الیاف (مانند زاویه پیچش و...) در یک مخزن تحت فشار کامپوزیتی نوع IV برای ذخیره هیدروژن به عنوان سوختی بر روی وسایل نقلیه، پرداختند.

رامیرز و همکارانش در سال 2015 [1]، علاوه بر مدل‌سازی فشار ترکیدگی در مخازن تحت فشار کامپوزیتی نوع IV با فشار داخلی 70 MPa در نرم افزار آباکوس (با استفاده از افزونه WCM) به روش تجربی نیز این فشار را به دست آوردند و به مقایسه نتایج تنش و جابجایی حاصل از شبیه‌سازی و روش تجربی پرداختند.

له و همکارانش در سال 2015 [20]، با استفاده از بهینه‌سازی در تحلیل آسیب پیش‌رونده و با کمک معیار تخریب هشین و کاهش خواص مکانیکی مواد به شبیه‌سازی تخریب مخازن هیدروژن تحت فشار کامپوزیتی نوع IV، در نرم افزار انسیس پرداختند. ایشان نتایج تجربی را با نتایج حاصل از دو مدل‌سازی المان‌های توپر و ترکیب المان‌های پوسته و توپر مقایسه کرده و دریافتند که هر دو مدل سازگاری مناسبی با واقعیت دارند و می‌توان برای کاهش زمان تحلیل و بهینه‌سازی از حالت ترکیب المان‌های پوسته و توپر با کمی دقت کمتر در محاسبه تنش‌ها نسبت مدل‌سازی با المان‌های توپر استفاده کرد.

له و همکارانش در سال 2015 [21]، به بررسی تاثیرات ناشی از پیچش الیاف مانند ضخامت لایه‌ها، زاویه الیاف و تعداد هر لایه بخصوص تاثیر لایه‌های محیطی بر روی فشار ترکیدگی مخزن تحت فشار کامپوزیتی دو لیتری نوع IV با فشار 70 MPa پرداختند.

در این پژوهش، به شبیه‌سازی المان محدود مخزن تحت فشار کامپوزیتی نوع IV با استفاده از نرم افزار تجاری آباکوس به منظور تعیین فشار ترکیدگی و عوامل موثر بر آن در این نوع مخازن، پرداخته شده است. در این شبیه‌سازی به منظور نزدیک شدن مدل ارائه شده برای این مخازن به نمونه واقعی آن و نیز افزایش دقت مدل‌سازی، پیچیدگی‌های موجود در هندسه و جهت‌گیری الیاف، بخصوص در ناحیه عدسی‌ها، با استفاده از افزونه WCM در نرم افزار آباکوس مدل‌سازی شده‌اند. در مدل‌سازی به کمک این افزونه، علاوه بر کمیت‌هایی که در حالت عادی برای مواد کامپوزیتی در نرم افزار آباکوس قابل تعریف هستند (مانند زاویه پیچش الیاف و ضخامت لایه‌ها)، می‌توان با تعیین و کنترل سایر کمیت‌های مرتبط با فرایند ساخت این مخازن، مانند پهنای باند الیاف¹، زاویه انتقال²، شعاع انتقال³، بخش پایانی⁴ و جمع‌شدگی انتهای لایه‌ها، به هندسه واقعی سازه نزدیک‌تر شد و در نتیجه به مدل‌سازی دقیق‌تری از رفتار مخزن تحت فشار کامپوزیتی نوع IV رسید. پس از مدل‌سازی دقیق مخزن تحت فشار کامپوزیتی نوع IV، نتایج تغییر شکل

⁵ Tsai-Hill

⁶ Tsai-Wu

⁷ Hashin

⁸ Toughness

¹ Band Width

² Transition Angle

³ Transition Radius

⁴ End Fraction

رفتار آن‌ها به صورت الاستیک همسانگرد عرضی^۴ فرض شده است. در این مخزن، پهنای باند و ضخامت هر لایه کامپوزیتی به ترتیب، 10 و 0.5 میلی‌متر فرض شده است و لایه‌چینی در نظر گرفته شده برای پوسته کامپوزیتی به صورت $[4_3/90_4/60_3/90_4/50_3/90_4/40_3/90_4/25_3/90_4/20_3/90_4/15_4]$ می‌باشد.

2-2- نحوه مدل سازی

مدل سازی مخزن تحت فشار کامپوزیتی نوع IV با مشخصات بیان شده در

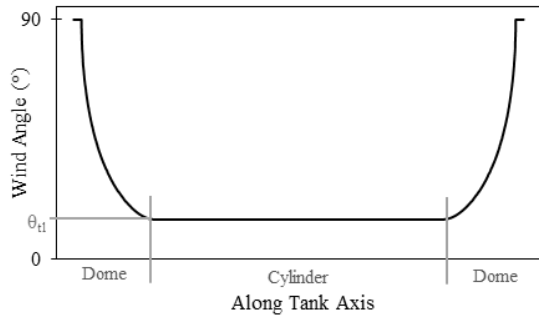


Fig. 2 Schematic wind angle variation along tank axis

شکل 2 شماتیکی از تغییرات زاویه پیچش در امتداد محور طولی مخزن

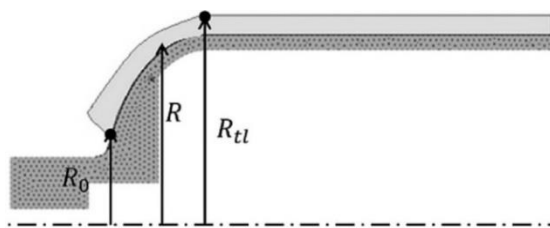


Fig. 3 Geometrical data for thickness and angle calculations in the domes [1]

شکل 3 اطلاعات هندسی برای محاسبه ضخامت و زاویه پیچش در عدسی‌ها [1]

جدول 1 مشخصات هندسی مخزن تحت فشار

Table 1 Geometry properties of pressure vessel

اندازه	کمیت
320	طول مخزن (mm)
190	طول قسمت استوانه‌ای مخزن (mm)
106	قطر داخلی قسمت استوانه‌ای مخزن (mm)
4	ضخامت لاینر (mm)
2	حجم مخزن (L)

جدول 2 خواص مکانیکی لاینر پلیمری و فلنج فلزی [24]

Table 2 Mechanical property of metallic boss and polymeric liner [24]

نام قطعه	جنس	E (GPa)	ν	ρ (kg/m ³)
لاینر	پلی‌آمید (PA6)	0.4	0.3	1500
فلنج	فولاد زنگ‌نزن (S.S. 316L)	200	0.3	8000

جدول 3 خواص مکانیکی لایه کامپوزیتی [26,25]

Table 3 Mechanical property of composite ply [25, 26]

E ₁ (GPa)	E ₂ (GPa)	ν ₁₂	G ₁₂ (GPa)	P (kg/m ³)
137	8.17	0.32	4.7	1550
X _T (MPa)	X _C (MPa)	Y _T (MPa)	Y _C (MPa)	S (MPa)
1470	980	39.2	78.4	78.4

⁴ Transversely Isotropic Elasticity

البته تاثیر هندسه عدسی‌ها، بر روی تغییر شکل این ناحیه و فشار ترکیدگی مخزن، ناحیه عدسی‌ها را به چالشی اساسی در طراحی و مدل سازی این نوع از مخازن تبدیل کرده است. در طراحی این مخازن نکته مهم در مورد ناحیه عدسی‌ها، این است که با شروع این نواحی، زوایای الیاف در لایه‌های مارپیچ^۱ (لایه‌هایی که با زوایای پیچش کمتر از 90° پیچیده می‌شوند) و نیز ضخامت آن‌ها تغییر می‌کنند. با استفاده از روابط (1) و (2)، می‌توان به ترتیب زاویه الیاف و ضخامت این لایه‌ها در هر نقطه از ناحیه عدسی را به دست آورد. همان‌طور که از رابطه (1) نیز مشخص است، با شروع این نواحی، زاویه الیاف مارپیچ، از مقدار زاویه پیچش اولیه آن‌ها (در ناحیه استوانه‌ای مخزن) بیشتر شده و به سمت زاویه 90° افزایش می‌یابد و در آخرین نقطه هر لایه، این زاویه، به 90° خواهد رسید (مطابق شکل 2). در شکل 2، تغییرات زاویه پیچش الیاف در امتداد محور طولی مخزن به صورت شماتیک رسم شده است. همچنین بر اساس رابطه (2)، هندسه عدسی‌ها موجب کاهش شعاع پیچش و نیز ازدیاد رزین در این نواحی شده که افزایش ضخامت لایه‌ها در این نواحی را به دنبال دارد.

$$\theta(R) = \sin^{-1} \left(\frac{R_0}{R} \right) \pm \delta \left(\frac{R - R_0}{R_{tl} - R_0} \right)^n \quad (1)$$

$$t(R) = \frac{t_{tl} \cos(\theta_{tl})}{\cos(\theta_r)} \times \frac{R_{tl}}{R + 2B_W \left(\frac{R - R_0}{R_{tl} - R_0} \right)^4} \quad (2)$$

در روابط (1) و (2)، مطابق شکل 3، R فاصله شعاعی از محور طولی مخزن تا نقطه مورد نظر در لایه، $\theta(R)$ و $t(R)$ به ترتیب زاویه الیاف و ضخامت لایه در نقطه مورد نظر بر حسب R_0 ، R ، فاصله شعاعی از محور طولی مخزن تا آخرین نقطه لایه، R_{tl} فاصله شعاعی داخلی لایه از محور طولی مخزن تا آن لایه در قسمت استوانه‌ای، t_r ضخامت لایه در قسمت استوانه‌ای $(R=R_{tl})$ ، θ_{tl} زاویه پیچش اولیه الیاف در قسمت استوانه‌ای $(R=R_{tl})$ ، زاویه الیاف در نقطه مورد نظر $(R=R_{tl})$ و B_W پهنای دسته الیاف بوده و n تاثیر اصطکاک را تنظیم می‌کند. δ کمیت کنترل پیچش هندسه عدسی است که از رابطه (3) به دست می‌آید. اگر $\delta=0$ انتخاب شود (مدل پیچش بدون اصطکاک)، رابطه (3) به رابطه کلاسیک کلاروت^۲ مربوط می‌شود و اگر اصطکاک در محاسبات در نظر گرفته شود ($\delta \neq 0$)، فقط انتخاب یک نقطه برای چرخش را اجازه می‌دهد [23,22,1].

$$\delta = \theta_r - \sin^{-1} \left(\frac{R_0}{R} \right) \quad (3)$$

در این پژوهش، به مدل سازی اجزاء محدود متقارن محوری^۳ فشار ترکیدگی در یک مخزن تحت فشار کامپوزیتی نوع IV، با مشخصات هندسی آورده شده در جدول 1 و فشار داخلی 200 MPa، جهت ذخیره هیدروژن متراکم گازی پرداخته شده و تحلیل آن به صورت خطی انجام پذیرفته است.

در این مخزن لاینر پلیمری از جنس پلی‌آمید PA6، فلنج‌های فلزی از فولاد زنگ‌نزن 316L و کامپوزیت از جنس کربن/اپوکسی می‌باشد. رفتار فولاد زنگ‌نزن 316L مورد استفاده در فلنج‌ها، الاستیک-پلاستیک و رفتار پلیمر PA6 مورد استفاده در لاینر، به دلیل عدم شرکت لاینر در تغییر شکل کلی مخزن و نیز کرنش بسیار کم آن در اثر سفتی بالای کامپوزیت، الاستیک فرض می‌شود. خواص مکانیکی لاینر پلیمری و فلنج‌های فولادی در جدول 2 آورده شده است. خواص مکانیکی لایه‌های کامپوزیتی نیز در جدول 3 آورده و

¹ Helical Layers

² Classical Clairaut Formulation

³ Axisymmetric

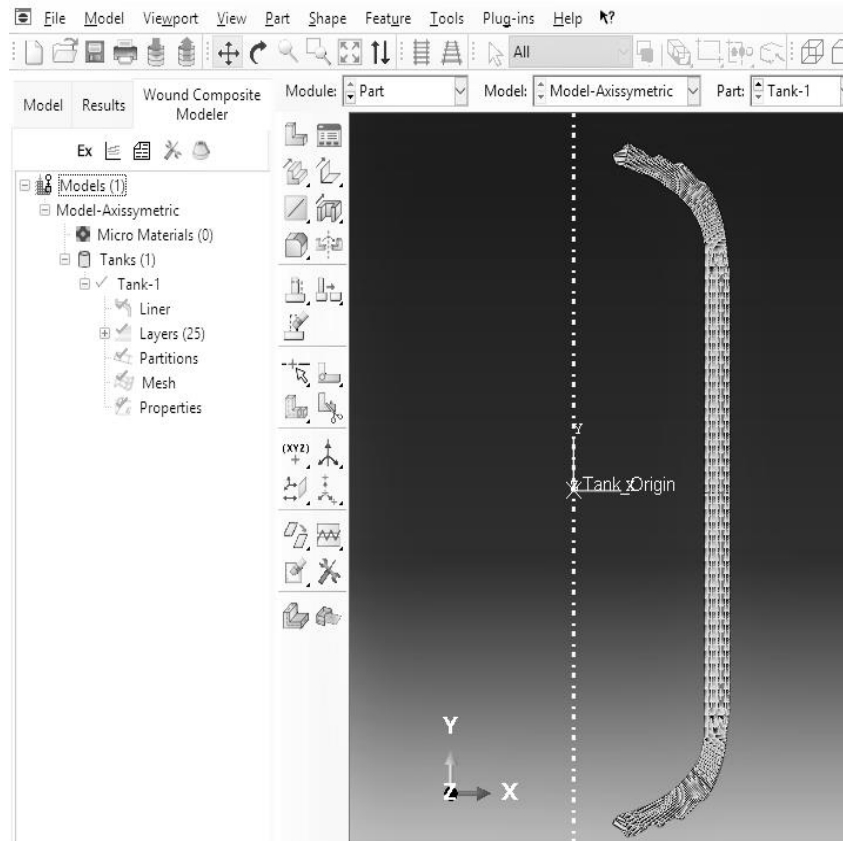


Fig. 4 Composite shell modeled by WCM and WCM plug-in tree

شکل 4 نمایی از پوسته کامپوزیتی مدل شده با افزونه WCM و نمودار درختی افزونه WCM

شکل 1 شرایط مرزی و جهات جابجایی‌های اندازه‌گیری شده ناشی از تغییر شکل مخزن، در اثر اعمال فشار داخلی را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. نوع المان‌بندی تمام اجزای مخزن، برای اطمینان از انطباق هرچه بهتر المان‌بندی با پیچیدگی‌های هندسی عدسی‌ها، به صورت المان مثلثی متقارن محوری درجه دوم³ (CAX6) در نظر گرفته می‌شود.

3- نتایج و بحث 3-1- صحت‌سنجی

با توجه به عدم انجام آزمایش عملی در این پژوهش، ابتدا به صحت‌سنجی و مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی این پژوهش با نتایج شبیه‌سازی و نتایج عملی ارائه شده در مرجع [1] پرداخته شده است. نمودار شکل 5، تغییرات جابه‌جایی‌های طولی مخزن بر حسب فشار داخلی را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج مدل‌سازی المان محدود با نتایج تجربی نشان می‌دهد که ابتدای نمودار تجربی برخلاف شبیه‌سازی‌های ارائه شده، به صورت غیرخطی شروع می‌شود. این پدیده ممکن است به دلیل وجود شکاف اولیه ما بین فلنج‌های فلزی و پوسته کامپوزیتی که در حین فرایند پیچش و یا در حین فرایند عمل‌آوری⁴، به دلیل تفاوت در ضریب انبساط این دو ماده ایجاد شده است، رخ داده باشد. لازم به ذکر است که در شبیه‌سازی کنونی و نیز شبیه‌سازی مرجع [1]، این امر به دلیل فرض تماس کامل بین تمام اجزاء مخزن، قابل مشاهده نمی‌باشد. مطابق مشخصات پلاستیک ارائه شده برای فولاد زنگ‌نزن 316L در مرجع [1]، فلنج‌های فلزی در کرنشی معادل 0.0017 که در فشار 60 MPa رخ

بخش قبلی با ابعاد میلی‌متری و به صورت متقارن محوری، تغییر شکل پذیر¹ و با ویژگی پوسته به صورت شبه استاتیک² در نرم‌افزار آباکوس انجام می‌شود. فلنج‌های فلزی و لاینر پلیمری، در بخش مربوط به مدل‌سازی قطعات در نرم‌افزار، مدل می‌شوند. مدل‌سازی پوسته کامپوزیتی به دلایلی که در بخش‌های قبلی اشاره شد، با تعیین کمیت‌های هندسی چون زاویه پیچش الیاف و ضخامت لایه‌ها و نیز با تعیین و کنترل کمیت‌های مرتبط با فرایند ساخت این مخازن، مانند پهنای باند، زاویه انتقال، شعاع انتقال، بخش پایانی و جمع‌شدگی، توسط افزونه WCM انجام می‌پذیرد. شکل 4 نمایی از افزونه WCM و نیز پوسته کامپوزیتی ساخته شده توسط این افزونه، نمایش داده شده است. همان‌طور که از شکل 4 نیز مشخص است افزونه WCM به صورت نمودار درختی در سمت چپ پنجره نرم‌افزار آباکوس اضافه می‌شود. لایه‌چینی به همراه کمیت‌های هندسی و ساختی در افزونه WCM وارد می‌شوند تا هندسه پوسته کامپوزیتی مخزن توسط افزونه مدل‌سازی شود.

فرض شده است لاینر پلیمری به فلنج‌های فولادی و پوسته کامپوزیتی کاملاً چسبیده‌اند و از جدایش احتمالی آنها از یکدیگر صرف‌نظر شده است. فشار داخلی مخزن به صورت تابعی خطی از فشار و زمان تعریف شده که از صفر شروع و تا 200 MPa افزایش می‌یابد. این فشار مطابق شکل 1 به صورت فشار داخلی به تمام سطح داخلی مخزن وارد می‌شود. شرایط مرزی در این مسأله به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

- (1) درجه آزادی صفر برای یک سر مخزن (یک سر مقید)
- (2) درجه آزادی طولی برای سر دیگر مخزن

³ Axisymmetric Quadratic Triangles

⁴ Curing Process

¹ Deformable

² Quasi Static

مارپیچ داخلی با زاویه پیچش 20° ، لایه 10 نماینده لایه های مارپیچ داخلی با زاویه پیچش 25° ، لایه 14، لایه مارپیچ داخلی با زاویه پیچش 40° ، لایه 15 نماینده لایه های مارپیچ داخلی با زاویه پیچش 50° و لایه 19 نماینده لایه های مارپیچ داخلی با زاویه پیچش 60° بوده و لایه های 5، 9، 13 و 18 لایه های محیطی داخلی و لایه 22، نماینده لایه های محیطی خارجی می باشند. همچنین در نمودارهای شکل 7- الف و ب، قسمت استوانه ای مخزن در مختصات طولی از 95 mm تا 95 mm و ناحیه عدسی های مخزن در مختصات طولی از 95 mm تا 160 mm و نیز از 95 mm تا 160 mm نمایش داده شده است.

مطابق نمودار شکل 7- الف، تنش در راستای الیاف، در قسمت استوانه ای مخزن و در لایه های محیطی بیش تر از لایه های مارپیچ است. بیش ترین تنش در راستای الیاف در داخلی ترین لایه محیطی (لایه 5) اتفاق می افتد و این تنش در لایه های محیطی و در راستای ضخامت پوسته کامپوزیتی از داخل به خارج کاهش می یابد. برای لایه های مارپیچ در قسمت استوانه ای، هرچه زاویه پیچش الیاف کم تر باشد، تنش راستای الیاف نیز کاهش خواهد یافت و در ناحیه عدسی ها، هر چه زاویه پیچش الیاف کم تر باشد، تنش راستای الیاف بیش تر خواهد بود.

مطابق نمودار شکل 7- ب، برخلاف نمودار تنش در راستای الیاف (نمودار شکل 7- الف)، تنش در راستای عمود بر الیاف، در قسمت استوانه ای مخزن و در لایه های محیطی کم تر از لایه های مارپیچ و تقریباً صفر است و برای لایه های مارپیچ، هرچه زاویه پیچش الیاف کم تر باشد تنش راستای عمود بر الیاف نیز افزایش می یابد. در ناحیه عدسی ها برای لایه های مارپیچ، تنش در راستای عمود بر الیاف لایه های با زاویه الیاف بیش تر منفی می گردد.

لازم به ذکر است در نمودارهای شکل 7 تغییرات غیرخطی سطح تنش لایه های مارپیچ در ناحیه عدسی ها (به خصوص برای لایه اول) می تواند به دلیل هندسه به خصوص لایه ها (روابط 1 و 2)، تأثیر تعریف پارامترهای ساختی چون بخش پایانی و یا المان بندی در این نواحی، رخ داده باشد. معیارهای متعددی برای تخریب مواد کامپوزیتی ارائه شده است که این پژوهش به معیارهای تسای- هیل، تسای- وو و هشین پرداخته می شود. روابط (4) و (5)، بیان کننده معیار تخریب تسای- هیل است که در آن σ_1 ، σ_2 و τ_{12} به ترتیب تنش در راستای الیاف، تنش در راستای زمینه و تنش برشی بوده و S و Y_C ، Y_T ، X_C ، X_T به ترتیب استحکام کششی در راستای الیاف، استحکام فشاری در راستای الیاف، استحکام کششی در راستای زمینه، استحکام فشاری در راستای زمینه و استحکام برشی می باشند. همچنین در این روابط، ضرایب X و Y به ترتیب استحکام در راستای الیاف و استحکام در راستای زمینه بوده و FI_{TH} شاخص تخریب¹ در معیار تسای- هیل می باشد.

$$FI_{TH} = \frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} \quad (4)$$

$$X = \begin{cases} X_T & : \sigma_1 > 0 \\ X_C & : \sigma_1 < 0 \end{cases}, \quad Y = \begin{cases} Y_T & : \sigma_2 > 0 \\ Y_C & : \sigma_2 < 0 \end{cases} \quad (5)$$

روابط (6) و (7) بیان کننده معیار تخریب تسای- وو است که در آن ضرایب F_1 ، F_2 ، F_{11} ، F_{22} برحسب استحکام در راستای الیاف و زمینه بوده و ضریب F_{66} بر حسب استحکام برشی می باشد که در رابطه (7) مشخص شده اند. در رابطه (6)، بیانگر شاخص آسیب در معیار تسای- وو می باشد.

$$FI_{TW} = F_1\sigma_1 + F_1\sigma_1^2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 - \sigma_1\sigma_2\sqrt{F_{11}F_{22}} \quad (6)$$

¹ Failure Index

می دهد، در ناحیه گلوگاهی وارد ناحیه پلاستیک خواهند شد. در شکل 6، خروجی کرنش پلاستیک نرم افزار آباکوس حاصل از شبیه سازی این پژوهش نشان داده شده است. مطابق شکل 6، در شبیه سازی این پژوهش نیز، کرنش پلاستیک در قسمت گلوگاه فلنچها و در فشار 60 MPa از مقدار 0.0017 بیشتر خواهد شد که این امر نشان دهنده ورود قسمت گلوگاهی فلنچها در فشار 60 MPa به ناحیه پلاستیک است. بنابراین با توجه به شکل های 5 و 6، شبیه سازی انجام شده از دقت خوبی برخوردار است و می توان از آن برای بررسی فشار ترکیدگی استفاده کرد.

3-2- پیش بینی فشار ترکیدگی در مخزن

در افزونه WCM، پس از تعیین هندسه و کمیت ها، نرم افزار برای تحلیل، اقدام به اختصاص خواص معادل برای پوسته کامپوزیتی و نیز تولید مدل می کند، که این امر به صورت محاسبه خواص معادل در هر المان پوسته کامپوزیتی انجام می شود. این روش، باعث ایجاد المان هایی با خواص معادل در پوسته کامپوزیتی به جای لایه های کامپوزیتی می شود که منجر به عدم امکان استفاده مستقیم از معیارهای تخریب مواد کامپوزیتی در نرم افزار آباکوس می شود. بنابراین برای استفاده از روابط معیارهای تخریب مواد کامپوزیتی، به کدنویسی روابط این معیارها، نیاز است.

به کمک افزونه WCM، می توان تنش ها و یا کرنشها در راستای الیاف و راستای عمود بر الیاف و نیز برشی در هر لایه را در امتداد محور طولی مخزن رسم کرد. نمودار شکل 7- الف، تنش در راستای الیاف و نمودار شکل 7- ب، تنش در راستای عمود بر الیاف را در فشار 60 MPa در امتداد محور طولی مخزن نشان می دهند. در نمودارهای شکل 7- الف و ب، لایه های مارپیچ با رنگ مشکی و لایه های محیطی با رنگ طوسی و نازک تر رسم شده اند و لایه 1 نماینده لایه های مارپیچ داخلی با زاویه پیچش 15° ، لایه 6 نماینده لایه های

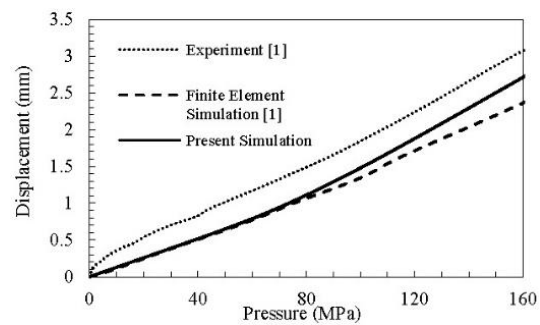


Fig. 5 Comparison of axial displacement of tank in burst simulations with experimental data

شکل 5 مقایسه جابه جایی طولی مخزن در شبیه سازی های تخریب با داده های آزمایشگاهی

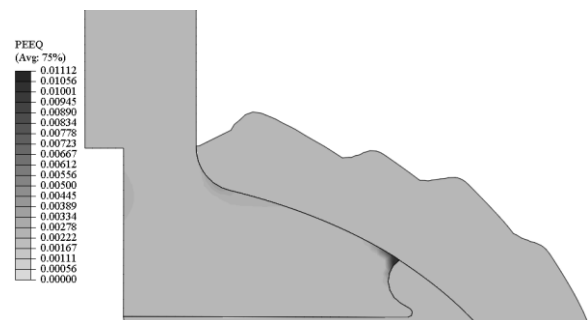


Fig. 6 Equivalent plastic strain in present simulation

شکل 6 کرنش پلاستیک معادل در شبیه سازی این پژوهش

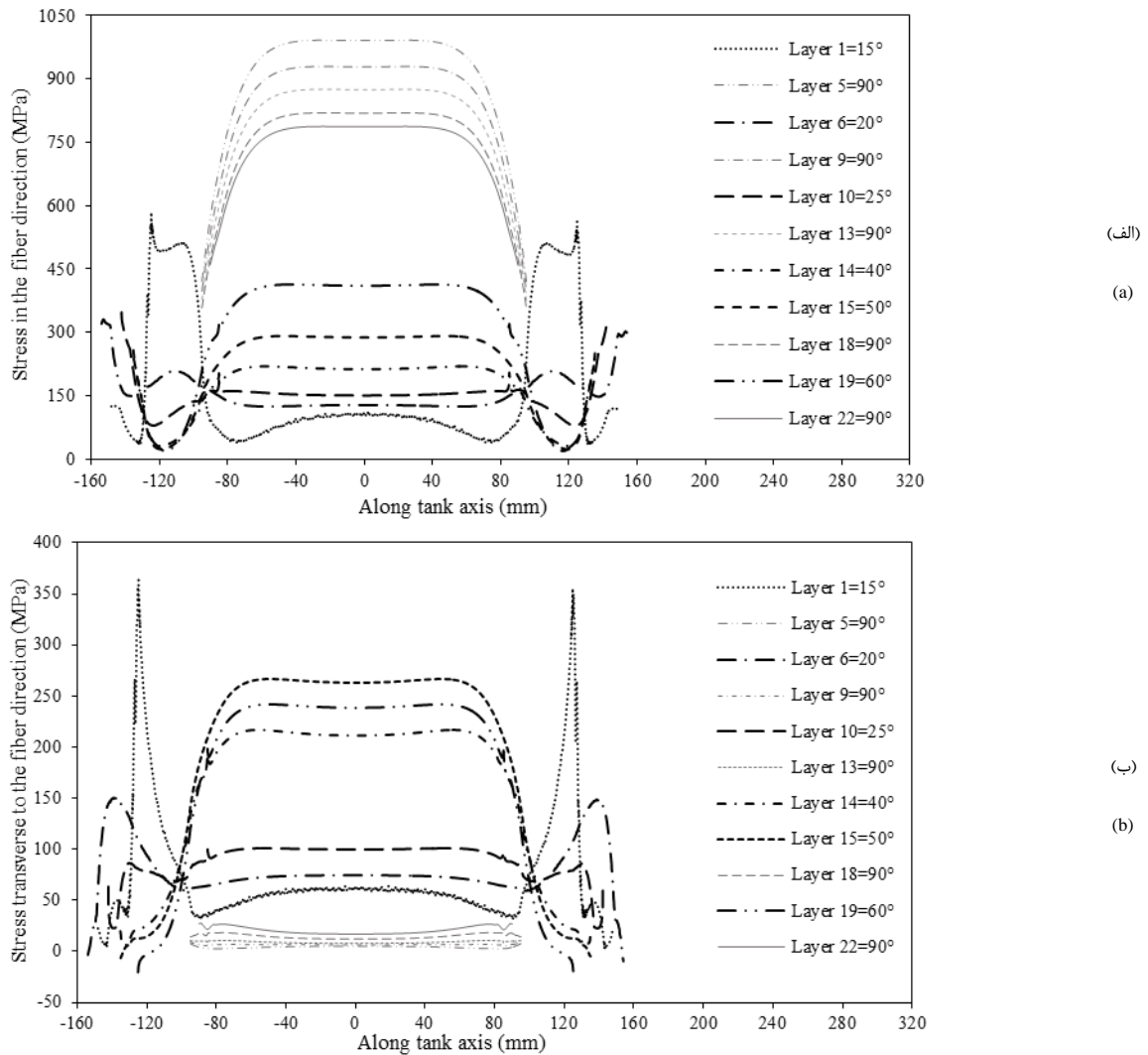


Fig. 7 (a) Stress in the fiber direction (b) Stress transverse to the fiber direction; along the tank axis in 60 MPa

شکل 7 (الف) تنش در راستای الیاف (ب) تنش در راستای عمود بر الیاف، در امتداد محور طولی مخزن در فشار 60 MPa

$$\sigma_1 > 0 \Rightarrow FI_{HFT} = \left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \alpha \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 \quad (8)$$

$$\sigma_1 < 0 \Rightarrow FI_{HFC} = \left(\frac{\sigma_1}{X_C}\right)^2 \quad (9)$$

$$\sigma_2 > 0 \Rightarrow FI_{HMT} = \left(\frac{\sigma_2}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 \quad (10)$$

$$\sigma_2 < 0 \Rightarrow FI_{HMC} = \left(\frac{\sigma_2}{2S^T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2S^T}\right)^2 - 1\right] \left(\frac{\sigma_2}{Y_T}\right) + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L}\right)^2 \quad (11)$$

همان طور که قبلاً نیز اشاره شد، هر سه معیار تخریب در نظر گرفته شده، توانایی تشخیص تخریب را دارند. بدین صورت که، در هر لایه‌ای که شاخص آسیب بیش تر از یک دارد، تخریب رخ خواهد داد و در هر لایه‌ای که شاخص آسیب کم تر از یک دارد، تخریب رخ نخواهد داد و این امر در معیار هشین، علاوه بر تخریب، نوع مود شکست را نیز مشخص خواهد کرد.

مطابق جداول 4 و 5، در فشار 5 MPa اولین تخریب براساس معیارهای تخریب تسای- هیل و تسای- وو، در لایه اول اتفاق می افتد و در فشار 92 MPa تمامی لایه‌ها براساس این دو معیار، دچار تخریب می شوند. در صورتی که طبق معیار هشین، برای لایه اول در فشار 5 MPa و نیز برای لایه‌های محیطی 9، 13 و 18 در فشار 92 MPa، تخریبی رخ نداده و این

$$F_1 = \frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_C}, \quad F_2 = \frac{1}{Y_T} - \frac{1}{Y_C}, \quad F_{11} = \frac{1}{X_T X_C}, \quad F_{22} = \frac{1}{Y_T Y_C}, \quad F_{66} = \frac{1}{S^2} \quad (7)$$

روابط (8-11)، بیان کننده معیار تخریب هشین می باشند. در روابط (11-8)، بیانگر شاخص آسیب در معیار هشین می باشد که در آن ها FI_{HFC} ، FI_{HFT} و FI_{HMC} و FI_{HMT} به ترتیب بیانگر شاخص آسیب معیار هشین در چهار مود تخریب کشش در الیاف، فشار در الیاف، کشش در زمینه و فشار در زمینه هستند. در رابطه (8)، ضریب $\alpha = 1$ در نظر گرفته می شود. در رابطه (11)، S^L و S^T به ترتیب استحکام برشی عرضی¹ و استحکام برشی طولی² بوده که $S^T = S_{13}$ و $S^L = S_{12} = S$ می باشد. معیارهای تسای- هیل و تسای- وو فقط شکست را تشخیص می دهند و نمی توانند مدهای تخریب را تشخیص دهند؛ در صورتی که در معیار هشین، علاوه بر تشخیص شکست، مدهای تخریب نیز، قابل مشاهده است. روابط (8-11)، به ترتیب بیانگر چهار مود تخریب کشش در الیاف، فشار در الیاف، کشش در زمینه و فشار در زمینه می باشند [28,27].

¹ Transverse Shear Strength

² Longitudinal Shear Strength

جدول 4 شاخص های آسیب معیارهای تخریب تسای- هیل، تسای- وو و هشین در فشار 5 MPa برای هر لایه

Table 4 Failure indices of Tsai-Hill, Tsai-Wu and Hashin failure criteria at 5 MPa for each Layer

F_{HMC}	F_{HMT}	F_{HFT}	F_{HFT}	F_{TW}	F_{TH}	زاویه الیاف در لایه (درجه)	شماره لایه
-	0.081	-	0.082	1.077	1.095	15	1
-	0.027	-	0.027	0.206	0.325	15	2
-	0.018	-	0.019	0.113	0.214	15	3
-	0.013	-	0.013	0.189	0.308	15	4
-	0.000	-	0.003	0.003	1.4e-10	90	5
-	0.000	-	0.000	0.025	0.089	20	6
-	0.006	-	0.006	0.100	0.202	20	7
-	0.006	-	0.006	0.118	0.226	20	8
-	0.000	-	0.003	0.003	0.8e-8	90	9
-	0.003	-	0.003	0.047	0.125	25	10
-	0.003	-	0.003	0.048	0.126	25	11
-	0.003	-	0.003	0.049	0.127	25	12
-	0.000	-	0.002	0.003	1e-6	90	13
-	0.001	-	0.001	0.206	0.329	40	14
-	0.006	-	0.006	0.317	0.440	50	15
-	0.005	-	0.005	0.313	0.436	50	16
-	0.005	-	0.005	0.310	0.433	50	17
-	0.000	-	0.002	0.004	0.002	90	18
-	0.024	-	0.166	0.418	0.596	60	19
-	0.024	-	0.024	0.279	0.403	60	20
-	0.023	-	0.024	0.277	0.401	60	21
-	0.000	-	0.002	0.005	0.014	90	22
-	0.000	-	0.002	0.005	0.015	90	23
-	0.000	-	0.002	0.006	0.017	90	24
-	0.000	-	0.002	0.006	0.019	90	25

جدول 5 شاخص های آسیب معیارهای تخریب تسای- هیل، تسای- وو و هشین در فشار 92 MPa برای هر لایه

Table 5 Failure indices of Tsai-Hill, Tsai-Wu and Hashin failure criteria in 92 MPa for each Layer

F_{HMC}	F_{HMT}	F_{HFT}	F_{HFT}	F_{TW}	F_{TH}	زاویه الیاف در لایه (درجه)	شماره لایه
-	174.569	-	13.598	174.677	106.381	15	1
-	69.800	-	8.336	69.915	46.102	15	2
-	43.293	-	5.988	43.387	29.778	15	3
-	109.127	-	4.325	109.152	64.867	15	4
-	0.098	-	1.088	1.178	1.599	90	5
-	13.211	-	0.035	13.228	8.971	20	6
-	43.131	-	2.702	43.225	28.283	20	7
-	49.186	-	2.932	49.292	31.971	20	8
-	0.132	-	0.957	1.079	1.501	90	9
-	17.204	-	1.404	17.321	12.642	25	10
-	17.280	-	1.376	17.385	12.613	25	11
-	17.507	-	1.371	17.612	12.748	25	12
-	0.182	-	0.849	1.021	1.458	90	13
-	73.451	-	0.304	73.466	43.199	40	14
-	112.740	-	2.009	112.748	65.373	50	15
-	111.100	-	1.946	111.107	64.441	50	16
-	109.772	-	1.888	109.780	63.681	50	17
-	0.515	-	0.744	1.243	1.838	90	18
-	99.758	-	8.801	99.804	62.121	60	19
-	98.720	-	8.612	98.796	61.936	60	20
-	97.895	-	8.393	97.970	61.357	60	21
-	1.164	-	0.688	1.827	2.513	90	22
-	1.199	-	0.682	1.857	2.540	90	23
-	1.321	-	0.677	1.973	2.658	90	24
-	1.453	-	0.672	2.098	2.782	90	25

نتایج حاصل از بررسی شاخص آسیب هر معیار برای لایه‌ها، نشان‌دهنده وقوع تخریب در لایه‌های ماریچ جدول در فشارهای پایین‌تر نسبت به لایه‌های محیطی می‌باشد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که فشار ترکیدگی در مخازن تحت فشار کامپوزیتی نوع IV، فشاری است که در آن تمام لایه‌های محیطی مخزن دچار تخریب شده باشند.

همچنین نتایج حاصل از بررسی تحلیل‌های تنش توسط این معیارهای تخریب، فشارهای انفجار (بر اساس تخریب اولیه) و نیز ترتیب تخریب لایه‌های متفاوتی را برای مخزن شبیه‌سازی شده، پیش‌بینی می‌کنند. بر اساس این پیش‌بینی‌ها، پایین‌ترین فشار ترکیدگی مربوط به معیار تخریب تسای-وو و بالاترین فشار ترکیدگی مربوط به معیار تخریب هشین می‌باشد (جدول 6) که این امر نشان‌دهنده ارائه پاسخ محتاط‌تر توسط دو معیار تسای-هیل و تسای-وو نسبت به معیار هشین، به دلیل تأکید بیش از حد آن‌ها بر تأثیر موده‌های تخریب الیاف و زمینه بر روی یکدیگر، می‌باشد.

5- فهرست علائم

E	مدول یانگ (Pa)
FI	شاخص آسیب
G	مدول برشی (Pa)
S	استحکام برشی (Pa)
X	استحکام در راستای الیاف (Pa)
Y	استحکام در راستای عمود بر الیاف (Pa)

علائم یونانی

ν	ضریب پواسون
ρ	چگالی (Kg m^{-3})

بالانویس‌ها

L	طول
T	عرض

زیرنویس‌ها

1	در راستای الیاف
2	در راستای عمود بر الیاف
HFC	مود تخریب الیاف تحت فشار در معیار تخریب هشین
HFT	مود تخریب الیاف تحت کشش در معیار تخریب هشین
HMC	مود تخریب زمینه تحت فشار در معیار تخریب هشین
HMT	مود تخریب زمینه تحت کشش در معیار تخریب هشین
TH	معیار تخریب تسای-هیل
TW	معیار تخریب تسای-وو

6- مراجع

- [1] J. P. B. Ramirez, D. Halm, J. C. Granddier, S. Villalonga, F. Nony, 700 bar type IV high pressure hydrogen storage vessel burst-Simulation and experimental validation, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 38, pp. 13183-13192, 2015.
- [2] J. H. Hong, M. G. Han, S. H. Chang, Safety evaluation of 70MPa-capacity type III hydrogen pressure vessel considering material degradation of composites due to temperature rise, *Composite Structures*, Vol. 113, No. 1, pp. 127-133, 2014.
- [3] S. Aceves, J. Martinez-Frias, O. Garcia-Villazana, Analytical and experimental evaluation of insulated pressure vessels for cryogenic hydrogen storage, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 25, No. 11, pp. 1075-1085, 2000.
- [4] C. P. Fowler, A. C. Orifici, C. H. Wang, A review of toroidal composite pressure vessel optimisation and damage tolerant design for high pressure gaseous fuel storage, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, No. 47, pp. 22067-22089, 2016.
- [5] B. G. Sun, D. S. Zhang, F. S. Liu, Analysis of the cost-effectiveness of

لایه‌ها سالم هستند. به‌علاوه، مطابق جدول 5 و معیارهای تخریب تسای-هیل و تسای-وو، لایه 13 آخرین لایه‌ای است که در آن تخریب رخ می‌دهد، در صورتی‌که مطابق همین جدول و معیار هشین، لایه 18 آخرین لایه‌ای است که در آن تخریب رخ می‌دهد. البته در جدول 5، به‌عنوان مثال برای لایه 6، علاوه بر این که هر سه معیار تخریب تسای-هیل، تسای-وو و هشین، تخریب این لایه را پیش‌بینی کرده‌اند، معیار هشین مود شکست در این لایه را نیز شکست زمینه در کشش معرفی نموده است.

به‌علاوه از جدول 5 می‌توان دریافت که لایه‌های ماریچ دارای شاخص آسیب بیش‌تر نسبت به لایه‌های محیطی هستند که این امر نشان‌دهنده تخریب زودتر لایه‌های ماریچ نسبت به لایه‌های محیطی در ساختار مخزن می‌باشد. بنابراین فشار ترکیدگی مخزن، فشاری است که در آن تمامی لایه‌های محیطی قسمت استوانه‌ای مخزن، تخریب می‌شوند.

در جدول 6، فشار ترکیدگی بر اساس تخریب اولیه¹ و نیز آخرین لایه تخریب شده براساس هر سه معیار تخریب تسای-هیل، تسای-وو و هشین آورده شده است. همان‌طور که از نتایج جدول 6 نیز مشخص است، معیارهای تخریب تسای-هیل و تسای-وو به دلیل تأکید بیش از حد بر تأثیر موده‌های تخریب الیاف و زمینه بر روی یکدیگر، پاسخی محتاط‌تر نسبت به معیار هشین می‌دهند و پیشنهاد نمی‌شوند [27].

4- نتیجه‌گیری

مخازن تحت فشار کامپوزیتی از سه بخش فلنج‌های فلزی، لاینر پلیمری و کامپوزیت کربن/اپوکسی پیچیده شده، تشکیل شده‌اند. ساختار هندسی این مخازن در ناحیه عدسی‌ها دارای پیچیدگی‌های هندسی می‌باشد.

به همین منظور در این پژوهش، از افزونه WCM برای مدل‌سازی متقارن محوری فشار ترکیدگی مخزن دو لیتری تحت فشار کامپوزیتی نوع IV در نرم‌افزار آباکوس، استفاده شده است. در مدل‌سازی اجزاء محدود به کمک افزونه WCM در نرم‌افزار آباکوس، می‌توان علاوه بر کمیت‌هایی که در حالت عادی برای مواد کامپوزیتی در نرم‌افزار آباکوس قابل تعریف هستند (مانند زاویه پیچش الیاف و ضخامت لایه‌ها)، کمیت‌های مرتبط با فرایند ساخت این مخازن (مانند پهنای باند، زاویه انتقال و غیره) را نیز در نظر گرفت تا هندسه‌ای نزدیک به هندسه واقعی این مخازن، مدل شود.

به‌علاوه در این پژوهش، نتایج تحلیل تنش حاصل از شبیه‌سازی فشار ترکیدگی مخزن دو لیتری تحت فشار کامپوزیتی نوع IV در نرم‌افزار آباکوس، با استفاده از کدنویسی روابط معیارهای تخریب مواد کامپوزیتی چون تسای-هیل، تسای-وو و هشین، به پیش‌بینی فشار ترکیدگی در این مخزن پرداخته شده است. به این منظور، برای تشخیص شکست در هر لایه، کمیتی به‌نام شاخص آسیب برای هر معیار تعریف گردیده که اگر برای لایه‌ای بیش‌تر از یک بدست آید، تخریب لایه را در آن معیار نشان می‌دهد (جدول 4 و 5).

جدول 6 فشار ترکیدگی براساس معیارهای تخریب تسای-هیل، تسای-وو و هشین
Table 6 Burst pressure based on Tsai-Hill, Tsai-Wu and Hashin failure criteria

معیار تخریب	فشار ترکیدگی (MPa)	آخرین لایه تخریب شده
تسای-وو	85	13
تسای-هیل	92	13
هشین	107	18

¹ Damage initiation

- [16] M. Xia, H. Takayanagi, K. Kemmochi, Analysis of multi-layered filament-wound composite pipes under internal pressure, *Composite Structures*, Vol. 53, No. 4, pp. 483-491, 2001.
- [17] A. Sarkar, R. Banerjee, Net energy analysis of hydrogen storage options, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 30, No. 8, pp. 867-877, 2005.
- [18] C. Thomas, *Étude des mécanismes d'endommagement des composites fibres de carbone/matrice polyamide: application à la réalisation de réservoirs de stockage de gaz sous haute pression de type IV*, PhD Thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Français, 2011. (in French)
- [19] H. Roh, T. Hua, R. Ahluwalia, Optimization of carbon fiber usage in Type 4 hydrogen storage tanks for fuel cell automobiles, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, No. 29, pp. 12795-12802, 2013.
- [20] D. Leh, P. Saffré, P. Francescato, R. Arrieux, S. Villalonga, A progressive failure analysis of a 700-bar type IV hydrogen composite pressure vessel, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 38, pp. 13206-13214, 2015.
- [21] D. Leh, B. Magneville, P. Saffré, P. Francescato, R. Arrieux, S. Villalonga, Optimisation of 700 bar type IV hydrogen pressure vessel considering composite damage and dome multi-sequencing, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 38, pp. 13215-13230, 2015.
- [22] User's manual, Wound Composite Modeler for ABAQUS V6.14-1, Simulia Inc. 2008.
- [23] R. Wang, W. Jiao, W. Liu, F. Yang, A new method for predicting dome thickness of composite pressure vessels, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 29, No. 22, pp. 3345-3352, 2010.
- [24] M. Heidari-Rarani, M. Ahmadi-Jabali, E. Baniasadi, Burst modeling of type IV high pressure storage vessel, *Proceeding of The 5th International Conference on Composite Characterization, Fabrication and Application (CCFA-5)*, Tehran, Iran, December 20-21, 2016.
- [25] C. C. Liang, H. W. Chen, C.-H. Wang, Optimum design of dome contour for filament-wound composite pressure vessels based on a shape factor, *Composite Structures*, Vol. 58, No. 4, pp. 469-482, 2002.
- [26] A. Paknahad, M. H. Hojjati, A. Fathi, Dome design of composite pressure vessels using particle swarm optimization algorithm, in *Proceeding of 23rd Canadian Congress of Applied Mechanics (CANCAM-23)*, Vancouver, BC, Canada, 2011.
- [27] E. J. Barbero, *Finite Element Analysis of Composite Materials Using Abaqus™*, pp. 163-165, New York, CRC press, 2013.
- [28] Z. Hashin, Failure criteria for unidirectional fiber composites, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 47, No. 2, pp. 329-334, 1980.
- pressure for vehicular high-pressure gaseous hydrogen storage vessel, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, No. 17, pp. 13088-13091, 2012.
- [6] B. Katia, B. Hervé, Hydrogen high pressure tanks storages: overview and new trends due to H2 Energy specifications and constraints, *Proceeding of 16th World Hydrogen Energy Conference (WHEC-16)*, Lyon, France, June 13-16, 2006.
- [7] M. Bertin, D. Halm, B. Magneville, J. Renard, P. Saffré, S. Villalonga, One year OSIRHYS IV project synthesis: Mechanical behaviour of 700 bar type iv high pressure vessel code qualification, *Proceeding of 15th European Conference on Composite Materials (ECCM-15)*, pp. 8, Venice, Italy, June 24-28, 2012.
- [8] M. Bertin, S. Villalonga, M. Vernède, C. Magnier, P. Tissier, F. Nony, Mechanical behaviour of 700 bar type IV high pressure vessel: comparison between simulations and experiments through Osirhys IV project, *Proceeding of 15th European Conference on Composite Materials (ECCM-15)*, pp. 8, Venice, Italy, June 24-28, 2012.
- [9] S. Villalonga, M. Kempeneers, P. Saffré, J. Renard, D. Halm, F. Nony, OSIRHYS IV Project, 700 bar on-board composite pressure vessel mechanical behaviour prediction with uncertainties knowledge, *Proceeding of ASME 2011 Pressure Vessels and Piping Division Conference (PVP2011)*, American Society of Mechanical Engineers, Baltimore, Maryland, USA, pp. 97-106, July 17-21, 2011.
- [10] R. P. Willardson, D. L. Gray, T. K. DeLay, Improvements in FEA of Composite Overwrapped Pressure Vessels, *Proceeding of Society for the Advancement of Material and Porcess Engineering-Fall Technical Conference*, 2009.
- [11] D. Gray, D. Moser, Finite element analysis of a composite overwrapped pressure vessel, *Proceeding of 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Florida, pp. 3506, July 11-14, 2004.
- [12] D. K. Roylance, Netting analysis for filament-wound pressure vessels, *Army Materials and Mechanics Research Center Technical Note (AMMRC TN)*, Vol. 76, No. 3, USA, 1976.
- [13] M. Madhavi, Design and analysis of filament wound composite pressure vessel with integrated-end domes, *Defence Science Journal*, Vol. 59, No. 1, pp. 73, 2009.
- [14] Y. Doh, C. Hong, Progressive failure analysis for filament wound pressure vessel, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 14, No. 12, pp. 1278-1306, 1995.
- [15] M. Xia, K. Kemmochi, H. Takayanagi, Analysis of filament-wound fiber-reinforced sandwich pipe under combined internal pressure and thermomechanical loading, *Composite Structures*, Vol. 51, No. 3, pp. 273-283, 2001.