ماهنامه علمى پژوهشى



mme.modares.ac.ir

مدلسازی المان محدود تخریب در مخزن تحت فشار کامپوزیتی نوع IV با استفاده از افزونه WCM در نرمافزار آباکوس

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

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

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

* اصفهان، صندوق پستى 8174673441 «eng.ui.ac.ir» اصفهان، صندوق پستى

چکیدہ	اطلاعات مقاله
امروزه هیدروژن به عنوان یک منبع انرژی سازگار با محیط زیستT 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، رامحلی 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/پوکسی تشکیل شدهاند. در ناحیه	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 21 آذر 1396 پذیرش: 09 اسفند 1396 ارائه در سایت: 19 فروردین 1397
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 VV، 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 دقیق تری	<i>کلید واژگان:</i> مخزن تحت فشار پیچش الیاف افزونه WCM فشار ترکیرگ
پژوهش، مخزن تحت فشار کامپوزیتی نوع 1۷ با حجم داخلی دو لیتر، توسط افزونه WCM در نرمافزار اباکوس 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 تنشرهای راستای اصلی ماده و کدنویسی روابط حاکم بر معیارهای شکست مواد کامپوزیتی چون تسای–هیل، تسای–وو و هشین، فشار تخریب مخزن پیش،بینی شده است که در پژوهشرهای 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	ABSTRACT
Original Research Paper Received 12 December 2017 Accepted 28 February 2018 Available Online 08 April 2018	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
Keywords: Pressure vessel Filament winding WCM plug-in Burst pressure	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 می گردد [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:

متراکم^۱، جذب سطحی هیدروکسید فلزات^۲ و هیدروژن مایع برودتی^۳ برای ذخیرهسازی سوخت هیدروژن استفاده میشود که گاز هیدروژن متراکم نسبت به سایر روشهای ذخیرهسازی در میزان انرژی مصرفی بهینهتر است [3.4]. امروزه برای ذخیرهسازی هیدروژن به منظور استفاده از آن به عنوان سلولهای سوختی در وسایل نقلیه و حتی در سفینهها، از مخازن تحت فشار استفاده میشود.

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 حلقوی^۴

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 کامپوزیتی⁶ نوع IV به دلیل ویژگیهای منحصربفردشان مانند سبکتر بودن، به عنوان راهحلی مطمئن استفاده می شود. این مخازن از لاینر پلیمری، فلنجهای فلزی و پوسته کامپوزیتی الیاف کربن∥پوکسی تشکیل و به روش پیچش الیاف⁶ تولید می شوند. فرایند پیچش الیاف به یک روش محبوب در طیف گستردهای از صنايع براى ايجاد ساختارهايى با نسبت استحكام به وزن بسيار بالا تبديل شده است. در واقع، مخازن تحت فشار کامپوزیتی نوع IV، دارای ساختاری با نسبت استحكام به وزن بسيار بالا مى باشند كه اين ساختار ضمن كاهش وزن مخزن منجر به افزایش فشار ترکیدگی^۷ آن نیز میشود و این امر آنها را برای استفاده در صنایع هوا فضا مناسب می کند. به منظور افزایش کارایی این مخازن برای استفاده بر روی وسایلنقلیه، از آنها در فشارهای بالای 35 MPa و تا MPa 10 استفاده می شود. کامپوزیت های الیاف کربن √پوکسی بیش از پیش به منظور توسعه مخازن ذخیرهسازی 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 توسعه های کنونی بر روی مخازن تحت فشار کامپوزیتی نوع IV با فشار کاری بالا (MPa)، نتایج قابل قبولی (در فشار ترکیدگی، مقاومت به چرخه بالا و غیره) را نشان داده است [4,1-9]. استفاده از این مخازن در برنامه های 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، میشود [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 شبکهای^۸، روشی ساده و سنتی در طراحی این مخازن بهشمار میآید که در آن طرح مناسب، با استفاده از تکرار و سعی و خطا حاصل میشود. بنابراین استفاده از این روش تحلیلی نیاز به طراح با تجربه بالا دارد. در این روش، با صرفنظر کردن از سهم رزین در استحکام کامپوزیت فرض میشود 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

می شوند. البته در این روش فقط تنش در ناحیه استوانهای بدست می آید. با توجه به تاثیر هندسه عدسی بر روی تنش ها در ناحیه عدسی ها، با استفاده از این روش هندسه ای بهینه نسبت به هندسه های بیضوی و کروی برای ناحیه عدسی ها با نام هندسه ژئودزیک^۹ بدست می آید که در آن تغییرات کرنش در راستای الیاف در امتداد عدسی ها ناچیز است [10-13].

برای فهم بهتر تنش در ناحیه عدسیها، از روش تحلیل المان محدود^{۱۰} استفاده میشود. 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 میکند که این امر باعث تغییر هندسه مخزن در این ناحیهها میشود. 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 میشود [11].

برای استفاده از روش تحلیل شبکهای و المان محدود در نرمافزارهای تحلیلی چون آباکوس^{۱۱} و انسیس^{۱۲}، اقدام به کدنویسی موردی روابط این روشها و استفاده دستی از آنها در این نرمافزارها میشد و پس از آن، این روابط به صورت کدهای آماده اتوماتیک و نیمه انوماتیک به نرمافزارها اضافه و توسعه داده شد (مانند افزونه WCM¹¹ که به منظور طراحی مخازن کامپوزیتی برای نرمافزار آباکوس توسعه یافته است).

ده و هانگ در سال 1995 [41]، 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 [16,15]، به بررسی اثرات ترکیبی ترمومکانیک و فشار داخلی و نیز استخراج روابط تنشی برای مخزن کامپوزیت پیچیده شده چندلایه با استفاده از نظریه کلاسیک لایهای^{۱۴} 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 زیربرنامهها^{۱۵} در نرمافزار المان محدود آباکوس کردند.

سارکار و بنرجو در سال 2005 [17]، با استفاده از روش آنالیز انرژی شبکهای به مقایسه روشهای مختلف ذخیرهسازی هیدروژن پرداخته و دریافتند که گاز هیدروژن متراکم نسبت به سایر روشهای ذخیرهسازی در میزان انرژی مصرفی بهینهتر 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

DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.4.31.4

¹ Compressed Hydrogen Gas (CH₂) ² Metal Hydride Absorption

³ Cryogenic Liquid Hydrogen (LH₂)

⁴Hoop

⁵ Composite Overwrapped Pressure Vessels (COPVs)

⁶ Filament Winding

⁷ Burst Pressure

⁸ Netting Analysis

⁹ Geodesic

¹⁰ Finite Element Analysis (FEA)
¹¹ ABAQUS

¹² ANSYS

¹³ Wound Composite Modeler plug-in

¹⁴ Classical Laminate Theory

¹⁵ User Subroutines

علاوه در این پژوهش، به معرفی ابزاری تجاری برای نرمافزار تحلیل المان محدود آباکوس، در زمینه تحلیل و طراحی مخازن تحت فشار کامپوزیتی با نام WCM یرداخته 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 كامپوزيت الياف كربن/اپوكسي را نيز استخراج كرد.

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 وسایلنقلیه، يرداختند.

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 نرمافزار آباکوس (با استفاده از افزونه WCM) به روش تجربی نیز این فشار را بهدست آوردند و به مقایسه نتایج تنشی 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 شبیه سازی تخریب مخازن هیدروژن تحت فشار کامپوزیتی نوع IV، در نرمافزار انسیس پرداختند. ایشان نتایج تجربی را با نتایج حاصل از دو مدلسازی المان های توپر و ترکیب المان های 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 الياف مانند ضخامت لايهها، زاويه الياف و تعداد هر لايه بخصوص تاثير لایههای محیطی بر روی فشار ترکیدگی مخازن تحت فشار کامپوزیتی دو ليترى نوع IV با فشار MPa يرداختند.

در این پژوهش، به شبیهسازی المان محدود مخزن تحت فشار کامپوزیتی نوع IV با استفاده از نرمافزار 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 هندسی و جهت گیری الیاف، بخصوص در ناحیه عدسیها، با استفاده از افزونه WCM در نرمافزار آباکوس مدلسازی شدهاند. در مدلسازی به کمک این افزونه، علاوه بر کمیتهایی که در حالت عادی برای مواد کامپوزیتی در نرمافزار آباکوس قابل تعريف هستند (مانند زاويه پيچش الياف و ضخامت لايهها)، مي توان با تعیین و کنترل سایر کمیتهای مرتبط با فرایند ساخت این مخازن، مانند پهنای باند الیاف'، زاویه انتقال'، شعاع انتقال"، بخش پایانی[†] 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

بهدست آمده با نتایج تجربی موجود در مراجع مقایسه شده است. همچنین، با استخراج تنشهای راستای اصلی ماده از نرمافزار آباکوس و کدنویسی روابط حاکم بر معیارهای شکست مواد کامپوزیتی چون تسای- هیل^۵، تسای- وو^۶ و هشین^۷، فشار ترکیدگی مخزن پیشبینی شده است که در پژوهشهای دیگر به آن پرداخته نشده است.

2- مدلسازی اجزاء محدود 1-2- بيان 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) لاينر پليمري كه علاوه بر وظيفه انتقال فشار داخلي مخزن به پوسته کامپوزیتی، وظیفه تثبیتکنندگی چقرمگی^ کل سازه را نیز دارا مىباشد.

2) فلنجهای فلزی که برای اتصال مخزن به وسایل دیگر مانند دستگاه سوختگیری تعبیه می شود.

3) پوسته کامپوزیتی که وظیفه تحمل فشار را دارد.

مهمترین ویژگی مخازن 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 تحليل دقيق اجزاء محدود مخازن تحت فشار كامپوزيتي نوع IV ساخته شده به روش پیچش الیاف، از اهمیت بخصوصی برخوردار است. ساختار این مخازن تحت فشار كامپوزيتى، پيچيدە است؛ زيرا:

 آنها دارای ساختار چندلایهای متشکل از چندین ماده با تعداد زیادی سطح مشترک هستند.

2) چینش لایهها در این مخازن پیچیده هستند (چینش لایهها با زوایای پیچش مختلف از الگوی خاصی پیروی نمی کند).

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 شكل 1 مخزن تحت فشار كامپوزيتي نوع 4

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-15

¹ Band Width

²Transition Angle Transition Radius

⁴ End Fraction

⁵ Tsai-Hill ⁶ Tsai-Wu

⁷ Hashin

⁸ Toughness

البته تاثیر هندسه عدسیها، بر روی تغییر شکل این ناحیه و فشار ترکیدگی مخزن، ناحیه عدسیها را به چالشی اساسی در طراحی و مدلسازی 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 فخامت آنها تغییر میکنند. با استفاده از روابط (1) و (2)، میتوان به ترتیب همان طور 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 پیچش اولیه آنها (در ناحیه استوانهای مخزن) بیشتر 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 پیچش و نیز ازدیاد رزین در این نواحی شده که افزایش ضخامت لایهها در پیچش و نیز اردیاد رزین در این نواحی شده که افزایش ضخامت لایهها در پیچش و نیز اردیاد رزین در این نواحی شده که افزایش ضخامت لایها در

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

$$t(R) = \frac{t_{tl}\cos(\theta_{tl})}{\cos(\theta_{r})} \times \frac{R_{tl}}{R + 2B_{W}\left(\frac{R_{tl}-R}{R_{tl}-R_{0}}\right)^{4}}$$
(2)

در روابط (1) و (2)، مطابق شکل 3، R فاصله شعاعی از محور طولی مخزن تا نقطه مورد نظر در لایه، (R) θ و (R) به ترتیب زاویه الیاف و ضخامت لایه در نقطه مورد نظر بر حسب R، R فاصله شعاعی از محور طولی مخزن تا آخرین نقطه لایه، R_{II} فاصله شعاعی داخلی لایه از محور طولی مخزن تا آن لایه در قسمت استوانهای، t_{I} فاصله شعاعی از محور طولی مخزن تا آن واویه پیچش اولیه الیاف در قسمت استوانهای ($R=R_{II}$)، r زاویه الیاف در نقطه زاویه پیچش اولیه الیاف در قسمت استوانهای ($R=R_{II}$)، r زاویه الیاف در نقطه مورد نظر ($R=R_{II}$) و R_{II} پهنای دسته الیاف بوده و R تاثیر اصطکاک را بهدست می کند. δ کمیت کنترل پیچش هندسه عدسی است که از رابطه (3) بهدست می آید. اگر $\theta=\delta$ انتخاب شود (مدل پیچش بدون اصطکاک)، رابطه (3) به رابطه کلاسیک کلاروت^۲ مربوط می شود و اگر اصطکاک در محاسبات در نظر گرفته شود ($0\neq\delta$)، فقط انتخاب یک نقطه برای چرخش را اجازه می دهد [23,22,1].

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

در این پژوهش، به مدلسازی اجزاء محدود متقارن محوری^۲ فشار ترکیدگی در یک مخزن تحت فشار کامپوزیتی نوع IV، با مشخصات هندسی آورده شده در جدول 1 و فشار داخلی MPa 200، 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 J16L و کامپوزیت از جنس کربن/اپوکسی میباشد. رفتار فولاد زنگنزن J16L 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 لایهای کامپوزیتی نیز در جدول 3

δ

رفتار آنها به صورت الاستیک همسانگرد عرضی[†] 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[°]90/6^{°°}3/90/4[°]20[°]/90/2^{°°}20[°]/90/4[°]21] میباشد.

2-2- نحوه مدلسازی

مدلسازی مخزن تحت فشار کامپوزیتی نوع IV با مشخصات بیان شده در







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

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

جدول 1 مشخصات هندسي مخزن تحت فشار

 Table 1 Geometry properties of pressure vessel				
کمیت	اندازه			
طول مخزن (mm)	320			
طول قسمت استوانهای مخزن (mm)	190			
قطر داخلی قسمت استوانهای مخزن (mm)	106			
ضخامت لاينر (mm)	4			
حجم مخزن (L)	2			

		زى [24]	مری و فلنج فل	کانیکی لاینر پلیہ	ندول 2 خواص م
$\frac{\text{Table 2 Mec}}{\rho}$	hanical pro	E	tallic boss and	<u>t polymeric line ا</u> نس	r [24] نام قطعه ج
(kg/m ²) 1500	0.3	(GPa) 0.4		ی یآمید (PA6)	، لاينر پل
8000	0.3	200	(S.S. 316	- ولاد زنگنزن (£5	فلنج فو
		[وزيتي [26,25	کانیکی لایه کامپ	دول 3 خواص م
Table 3 Mec	hanical pro	operty of cor	nposite ply [2	5, 26]	
E_1	(E_2	V12	G_{12}	P

(GPa)	(GPa)	V12	(GPa)	(kg/m^3)
137	8.17	0.32	4.7	1550
X _T (MPa)	X _C (MPa)	Y_T (MPa)	<i>Y_C</i> (MPa)	S (MPa)
1470	980	39.2	78.4	78.4

⁴ Transversely Isotropic Elasticity

¹ Helical Layers

² Classical Clairaut Formulation

³ Axisymmetric



Eile Model Viewport View Part Shape Feature Tools Plug-ins Help ★?

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

بخش قبلی با ابعاد میلیمتری و به صورت متقارنمحوری، تغییر شکلپذیر و با ویژگی پوسته به صورت شبه استاتیک^۲ 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 الياف و ضخامت لايهها و نيز با تعيين و كنترل كميتهاى مرتبط با فرايند ساخت این مخازن، مانند پهنای باند، زاویه انتقال، شعاع انتقال، بخش پایانی و جمع شدگی، توسط افزونه WCM انجام می پذیرد. شکل 4 نمایی از افزونه WCM و نیز پوسته کامپوزیتی ساخته شده توسط این افزونه، نمایش داده شده است. همان طور 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 می شوند تا هندسه پوسته کامپوزیتی مخزن توسط افزونه مدلسازی شود.

فرض شده است لاینر پلیمری به فلنجهای فولادی و پوسته کامپوزیتی كاملا چسبیده اند 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 می شود. شرایط مرزی در این مسأله به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

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

شکل 1 شرایط مرزی و جهات جابجاییهای اندازه گیری 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 دوم^۳ (CAX6) در نظر گرفته می شود.

3- نتايج و بحث

1-3- صحت سنجي

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 نتايج مدلسازي المان محدود با نتايج تجربي نشان ميدهد كه ابتداي نمودار تجربی برخلاف شبیهسازیهای ارائه شده، به صورت غیرخطی شروع می شود. این پدیده ممکن است به دلیل وجود شکاف اولیه ما بین فلنجهای فلزی و یوسته کامیوزیتی که در حین فرایند پیچش و یا در حین فرایند عمل آوری، به دلیل تفاوت در ضریب انبساط این دو ماده ایجاد شده است، رخ داده باشد. لازم به ذکر است که در شبیه سازی کنونی و نیز شبیه سازی مرجع [1]، این امر به دلیل فرض تماس کامل بین تمام اجزاء مخزن، قابل مشاهده نمی باشد. 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

¹ Deformable

² Ouasi Static

³ Axisymmetric Quadratic Triangles

⁴ Curing Process

می دهد، در ناحیه گلوگاهی وارد ناحیه پلاستیک خواهند شد. در شکل 6، خروجی کرنش پلاستیک نرمافزار 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 فلنجها و در فشار MPa 60 از مقدار 0.0017 بیشتر خواهد شد که این امر نشان دهنده ورود قسمت گلوگاهی فلنجها در فشار MPa 0 به ناحیه پلاستیک است. بنابراین با توجه به شکلهای 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- پیشبینی فشار ترکیدگی در مخزن

در افزونه WCM، پس از تعیین هندسه و کمیتها، نرمافزار 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 میشود. این روش، باعث ایجاد المانهایی با خواص معادل در پوسته کامپوزیتی به جای لایههای کامپوزیتی میشود که منجر به عدم امکان استفاده مستقیم از معیارهای تخریب مواد کامپوزیتی در نرمافزار آباکوس میشود. بنابراین برای استفاده از روابط معیارهای تخریب مواد کامپوزیتی، به کدنویسی روابط این معیارها، نیاز است.

به کمک افزونه WCM، می توان تنشها 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 MPa 60 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 ناز کتر 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 شبیهسازیهای تخریب با دادههای آزمایشگاهی



Fig. 6 Equivalent plastic strain in present simulation شكل 6 كرنش پلاستيك معادل در شبيهسازى اين پژوهش

مارپیچ داخلی با زاویه پیچش $^{\circ}05$ ، لایه 10 نماینده لایههای مارپیچ داخلی با زاویه پیچش $^{\circ}25$ ، لایه 14، لایه مارپیچ داخلی با زاویه پیچش $^{\circ}06$ ، لایه 15 نماینده لایههای مارپیچ داخلی با زاویه پیچش $^{\circ}06$ و لایه 19 نماینده لایههای مارپیچ داخلی با زاویه پیچش $^{\circ}06$ بوده و لایههای 5، 9، 13 و 18 لایههای محیطی داخلی و لایه 22، نماینده لایههای محیطی خارجی میباشند. همچنین در نمودارهای شکل 7– الف و ب، قسمت استوانهای مخزن در مختصات طولی از mm 29- تا mm 50 و ناحیه عدسیهای مخزن در مختصات طولی از mm 50- تا mm 160- و نیز از mm 50 تا سا 160 نمایش داده شده است.

مطابق نمودار شکل 7- الف، تنش در راستای الیاف، در قسمت استوانهای مخزن و در لایههای محیطی بیش تر از لایههای مارپیچ است. بیش ترین تنش در راستای الیاف در داخلی ترین لایه محیطی (لایه 5) اتفاق میافتد و این تنش در لایههای محیطی و در راستای ضخامت پوسته کامپوزیتی از داخل به خارج کاهش مییابد. برای لایههای مارپیچ در قسمت استوانهای، هرچه زاویه پیچش الیاف کم تر باشد، تنش راستای الیاف نیز کاهش خواهد یافت و در ناحیه عدسیها، 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 استوانهای مخزن و در لایههای محیطی کمتر از لایههای مارپیچ و تقریبا صفر است و برای لایههای مارپیچ، هرچه زاویه پیچش الیاف کمتر باشد تنش راستای عمود بر الیاف نیز افزایش مییابد. در ناحیه عدسیها برای لایههای مارپیچ، تنش در راستای عمود بر الیاف لایههای با زاویه الیاف بیشتر منفی می گردد.

لازم به ذکر است در نمودارهای شکل 7 تغییرات غیرخطی سطح تنش لایههای مارپیچ در ناحیه عدسیها (به خصوص برای لایه اول) میتواند به دلیل هندسه به خصوص لایهها (روابط 1 و 2)، تأثیر تعریف پارامترهای ساختی چون بخش پایانی و یا المانبندی در این نواحی، رخ داده باشد.

معیارهای متعددی برای تخریب مواد کامپوزیتی ارائه شده است که در این پژوهش به معیارهای تسای- هیل، تسای- وو و هشین پرداخته میشود. روابط (4 و 5)، بیان کننده معیار تخریب تسای- هیل است که در آنها σ_i , σ_i و τ_{12} به ترتیب تنش در راستای الیاف، تنش در راستای زمینه و تنش برشی بوده و T_X X_C X_T و X 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

استای زمینه بوده و
$$FI_{\text{TH}}$$
 شاخص تخریب در معیار تسای- هیل میباشد.
 $\sigma_1^2 \quad \sigma_1 \sigma_2 \quad \sigma_2^2 \quad \tau_{12}^2$

$$F_{T_{\text{TH}}} = \frac{1}{X^2} - \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{S^2}$$

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

روابط (6 و 7) بیان کننده معیار تخریب تسای- وو است که در آنها ضرایب F_{22} و F_{11} F_{2} F_{1} F_{2} F_{11} F_{2} F_{1} F_{2} F_{11} F_{2} F_{11} F_{2} F_{11} F_{2} F_{11} F_{2} F_{2} F

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

¹ Failure Index



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 7 (الف) تنش در راستای الیاف (ب) تنش در ماستای عمود بر الیاف (ب) تنش در ماستای عمود بر الیاف (ماستان ماستان ماستان ماستان (ماستان ماستان ماستان ماستان (ماستان ماستان ماستان (ماستان ماستان ماستان ماستان ماستان (ماستان ماستان ماستان ماستان ماستان (ماستان ماستان (ماستان م

$$F_{1} = \frac{1}{X_{T}} - \frac{1}{X_{C}} , \quad F_{2} = \frac{1}{Y_{T}} - \frac{1}{Y_{C}} , \quad F_{11} = \frac{1}{X_{T}X_{C}} ,$$

$$F_{22} = \frac{1}{Y_{T}Y_{C}} , \quad F_{66} = \frac{1}{S^{2}}$$
(7)

روابط (8-11)، بیان کننده معیار تخریب هشین میباشند. $FI_{\rm H}$ در روابط -11) $FI_{\rm HFC}$ ($FI_{\rm HFT}$ ه. بیانگر شاخص آسیب معیار هشین در چهار مود $FI_{\rm HTT}$ و $FI_{\rm HMT}$ 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 $1 = \alpha$ در نظر گرفته میشود. در رابطه (11)، $T_{\rm C}$ و $^{J_{\rm C}}$ به ترتیب استحکام برشی عرضی¹ و استحکام برشی طولی⁷ بوده که $S_{\rm 12}=S^{-J_{\rm C}}$ میباشد. معیارهای تسای- هیل و تشایی- وو فقط شکست را تشخیص میدهند و نمیتوانند مودهای تخریب را تشخیص دهند؛ در صورتی که در معیار هشین، علاوه بر تشخیص شکست، مودهای 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 مود تخریب کشش در الیاق، فشار در الیاف، کشش در زمینه و فشار در زمینه

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

$$\sigma_1 < 0 \implies FI_{\rm HFC} = \left(\frac{\tau}{X_C}\right) \tag{9}$$

$$\sigma_2 > 0 \implies FI_{\rm max} = \left(\frac{\sigma_2}{T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{T}\right)^2 \tag{10}$$

$$\sigma_2 < 0 \implies FI_{\text{HMT}} = \left(\frac{\sigma_2}{2S^T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2S^T}\right)^2 - 1\right] \left(\frac{\sigma_2}{Y_T}\right) + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L}\right)^2$$
(10)

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 لایه ای که شاخص آسیب بیش تر از یک دارد، تخریب رخ خواهد داد و در هر لایه ای 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 5 اولین تخریب براساس معیارهای تخریب تسای- هیل و تسای- وو، در لایه اول اتفاق میافتد و در فشار 29 MPa تمامی لایهها براساس این دو معیار، دچار تخریب میشوند. درصورتی که طبق معیار هشین، برای لایه اول در فشار 5 MPa و نیز برای لایههای محیطی 9، 13 و 18 در فشار 20 MPa، تخریبی رخ نداده و این

¹ Transverse Shear Strength

² Longitudinal Shear Strength

محمد حيدرى رارانى و محسن احمدى جبلى

جدول 4 شاخصهای آسیب معیارهای تخریب تسای- هیل، تسای- وو و هشین در فشار 5 MPa و برای هر لایه
Table 4 Failure indices of Tsai-Hill, Tsai-Wu and Hashin failure criteria at 5 MPa for each Layer

FI _{HMC}	FI _{HMT}	FI _{HFT}	FI _{HFT}	$FI_{\rm TW}$	FI _{TH}	زاويه الياف در لايه (درجه)	شماره لايه
-	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 شاخصهای آسیب معیارهای تخریب تسای- هیل، تسای- وو و هشین در فشار MPa 92 برای هر لایه

Table 5 Failure indices of Tsai-Hill	Tsai-Wu and Hashin failure criteria in 92 MPa for each Lay	/er

FIHMC	FI _{HMT}	FI _{HFT}	FI _{HFT}	FI _{TW}	FI _{TH}	زاويه الياف در لايه (درجه)	شماره لايه
-	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

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.4.31.4]

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 می دهد، در صورتی که مطابق همین جدول و معیار هشین، لایه 18 آخرین لایه ای است که در آن تخریب رخ می دهد. 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 پیش بینی 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 مارپیچ دارای شاخص آسیب بیشتر نسبت به لایههای محیطی هستند که این امر نشاندهنده تخریب زودتر لایههای مارپیچ 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 اولیه^۱ و نیز آخرین لایه تخریب شده براساس هر سه معیار تخریب تسای- هیل، تسای- وو و هشین آورده شده است. همان طور که از نتایج جدول 6 نیز مشخص است، معیارهای تخریب تسای- هیل و تسای- وو به دلیل تأکید بیش از حد بر تأثیر مودهای تخریب الیاف و زمینه بر روی یکدیگر، پاسخی محتاطتر نسبت به معیار هشین میدهند و پیشنهاد نمی شوند [27].

4- نتیجه گیری

مخازن تحت فشار کامپوزیتی از سه بخش فلنجهای فلزی، لاینر پلیمری و کامپوزیت کربن∛پوکسی 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.

به علاوه در این پژوهش، نتایج تحلیل تنشی حاصل از شبیه سازی 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 پیش بینی فشار ترکیدگی در این مخزن پرداخته شده است. به این منظور، برای تشخیص شکست در هر لایه، کمیتی به ام شاخص آسیب برای هر معیار تعریف گردیده که اگر برای لایه ای بیش تر از یک بدست آید، تخریب لایه را در آن معیار نشان می دهد (جداول 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

آخرين لايه تخريب شده	فشار ترکیدگی (MPa)	معيار تخريب
13	85	تسای- وو
13	92	تسای– ھیل
18	107	هشين

¹ Damage initiation

نتایج حاصل از بررسی شاخص آسیب هر معیار برای لایهها، نشاندهنده وقوع تخریب در لایههای مارپیچ مخزن در فشارهای پایین تر نسبت به لایههای محیطی میباشد. بنابراین، می توان 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 تنشی 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 مودهای تخریب الیاف و زمینه بر روی یکدیگر، میباشد.

5- فهرست علايم

- E مدول يانگ (Pa)
- FI شاخص آسيب
- (Pa) مدول برشی (Pa)
- S استحکام برشی (Pa)
- (Pa) استحکام در راستای الیاف (X
- Y استحکام در راستای عمود بر الیاف (Pa)

علايم يونانى

- ν ضريب پواسيون
- ρ چگالی (Kgm⁻³)
 - بالانويسها
 - L طولی
 - T عرضی
 - زيرنويسها
- 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

- J. P. B. Ramirez, D. Halm, J. C. Grandidier, 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

199

DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.4.31.4

- [16] M. Xia, H. Takayanagi, K. Kemmochi, Analysis of multi-layered filamentwound 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
- [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
- [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 AbaqusTM, 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, Venise, 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, Venise, 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 fiberreinforced sandwich pipe under combined internal pressure and thermomechanical loading, *Composite Structures*, Vol. 51, No. 3, pp. 273-283, 2001.