



تحلیل قابلیت اطمینان تخریب در مخزن کامپوزیتی تحت فشار

رهام رفیعی^{*1}، سحر بازرگانی²

1- دانشیار، هوافضا، دانشگاه تهران، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه تهران، تهران

* تهران، کد پستی 1439957131، roham.rafi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 4 خرداد 1400

داوری اولیه: 22 خرداد 1400

پذیرش: 25 خرداد 1400

کلیدواژگان:

مخازن کامپوزیتی تحت فشار

فشار تخریب

عدم قطعیت تولید

شبیه‌سازی مونت کارلو

قابلیت اطمینان

چکیده

در این پژوهش، مخزن کامپوزیتی دارای آستری تحت فشار داخلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. تنش‌های لایه‌های مختلف با یکدیگر مقایسه می‌شوند. تحلیل تنش با استفاده از توسعه‌ی روشی بر اساس کدنویسی در نرم‌افزار متلب صورت می‌گیرد. به این ترتیب تنش‌های توزیع شده در بخش کامپوزیتی مخزن مورد مطالعه با استفاده از روش کلاسیک لایه‌چینی استخراج می‌شوند و با ارزیابی تخریب بر روی بحرانی‌ترین لایه و استفاده از معیار تخریب هشین، فشار تخریب اولین لایه به دست می‌آید. سپس بر اساس روش تخفیف لایه‌ای در چهارچوب مکانیک آسیب پیوسته، خواص مکانیکی لایه‌ی آسیب‌دیده تقلیل می‌یابد و مجدداً تحلیل تنش صورت گرفته و رخداد تخریب ارزیابی می‌گردد. این فرآیند آن قدر تکرار می‌شود تا تمام لایه‌ها تخریب را تجربه نمایند و فشار مذکور به عنوان فشار تخریب گزارش می‌گردد. در مرحله‌ی بعد، با استفاده از مدل‌سازی تصادفی و به کمک روش مونت کارلو، فشار تخریب با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ناشی از تولید و بررسی میزان تأثیر آن‌ها بر روی فشار تخریب پیش‌بینی می‌شود که در این پژوهش پارامترهای کسر حجمی و زاویه‌ی الیاف، به عنوان عدم قطعیت‌های مسئله، بررسی می‌شوند. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با داده‌های حاصل از آزمایش، حاکی از دقت قابل قبول این روش می‌باشد. سپس قابلیت اطمینان تک تک لایه‌های مخزن کامپوزیتی با استفاده از روش مرتبه‌ی اول، شاخص قابلیت اطمینان و احتمال تخریب لایه‌های مخزن، استخراج می‌شوند و در نهایت برای صحت‌سنجی نتایج به دست آمده، روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده می‌شود.

Reliability Analysis of Failure in Composite Pressure Vessels

Roham Rafiee*, Sahar Bazargani

Department of Aerospace Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

* P.O.B. 1439957131 Tehran, Iran, roham.rafi@ut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 25 May 2021
First Decision: 12 June 2021
Accepted: 15 June 2021

Keywords:

Composite Pressure Vessel
Failure Pressure
Manufacturing Uncertainty
Monte Carlo Simulation
Reliability

Abstract

In this research, a composite pressure vessel with a liner under internal pressure is investigated. Stress analysis is performed using a computer code written in MATLAB. Therefore, the stress components in the composite part of the studied vessel are extracted using the classical lamination theory (CLT) and then the occurrence of failure in the most critical layer is examined using the Hashin failure criteria. thus, the failure pressure associated with the first-ply-failure is obtained. Then, based on the ply-discount method in the context of continuum damage mechanics, the mechanical properties of the damaged layer are reduced and the stress analysis is performed again and the vessel failure is evaluated. This process repeats until all the layers experience failure and final pressure is reported as burst pressure. In the next step, by considering manufacturing-induced uncertainties and applying Monte Carlo method, the failure pressure of the vessel is obtained and the influence of uncertainties on the results is also studied. In this study, the parameters of fiber volume fraction and fiber orientations are assumed as the uncertainties. Comparison of the results with the experimental data indicates the accuracy of this method. Then, the reliability of each layer of the composite pressure vessel is studied using the first-order reliability method and finally, the Monte Carlo simulation is used to validate the results.

1- مقدمه

بالای خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها، مطالعه‌ی عدم قطعیت‌های هریک از پارامترهای طراحی مخازن کامپوزیتی امری مهم می‌نماید. رویکرد فعلی جهت طراحی در کشور، طراحی به روش سنتی یا قطعی² می‌باشد. در این روش جهت طراحی قطعات،

در نظر گرفتن خطاها و میزان عدم قطعیت¹ در مسائل مهندسی و بخصوص در کامپوزیت‌ها همواره از چالش‌های پیش روی محققان این عرصه بوده‌است. به دلیل تنوع و گستردگی آماری

² Traditional or Deterministic Approach

¹ Uncertainty

Please cite this article using:

R. Rafiee, S. Bazargani, Reliability Analysis of Failure in Composite Pressure Vessels, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 4, pp. 50- 61, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مونت کارلو برای شبیه‌سازی رفتار بحرانی، ارزیابی شاخص قابلیت اطمینان و حساسیت‌سنجی استفاده کردند [4].

می‌دانیم که قابلیت اطمینان استحکامی سازه‌های کامپوزیتی به مجموعه‌ای از پارامترها نظیر هندسه، خواص مواد و سطح بارگذاری مربوط می‌باشد. لی و همکاران با معرفی شبیه‌سازی مونت کارلو و روش رویه‌ی پاسخ توانستند قابلیت اطمینان ورق‌های کامپوزیتی از جنس آلومینیوم-کربن/اپوکسی را برای لوله‌های کامپوزیتی و با استفاده از معیار خرابی تسای-وو ارزیابی کنند [5].

در ادامه یانگ و همکاران استحکام نهایی و قابلیت اطمینان ورق‌های کامپوزیتی را تحت بار محوری فشاری و استفاده از روش المان محدود ارزیابی نمودند. آن‌ها از معیار خرابی تسای-وو برای پیش‌بینی خرابی استفاده کردند و نتایج روش خود را با استفاده از داده‌های پژوهش‌های منتشر شده، صحت‌سنجی نمودند. در ادامه اثرات ضخامت‌های مختلف ورق و پارامترهای هندسی دیگر را روی استحکام نهایی مطالعه و استخراج کردند و در نهایت با مرتبط ساختن روش المان محدود و رویه‌ی پاسخ، قابلیت اطمینان را ارزیابی نمودند [6].

دیموس و همکاران برای تخمین قابلیت اطمینان سازه‌های کامپوزیتی از یک تحلیل چند مقیاسه استفاده نمودند. آن‌ها عدم قطعیت‌ها را در مقیاس میکرو و ماکرو و مبتنی بر روش‌های یکسان‌سازی خواص، در نظر گرفتند و تحلیل قابلیت اطمینان را برای کابل‌هایی به جنس کربن/اپوکسی ارزیابی نمودند. از آنجایی که قابلیت اطمینان این گونه سازه‌ها با توجه به تخریب الیاف ارزیابی می‌شود، لذا شبیه‌سازی‌های عددی برای مرتبط ساختن روش‌های قابلیت اطمینان و مدل‌سازی المان محدود برای استخراج بارگذاری ماکروسکوپی و میکرومکانیک برای تخمین خواص الاستیک مورد نیاز می‌باشد [7، 8].

ژیانگ و همکاران از روش قابلیت اطمینان برگشتی (معکوس) و معیار تسای-وو برای تخمین عمر خستگی احتمالاتی چندلایه‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری چند محوره استفاده نمودند [9].

طراحی کامپوزیت‌های غیر ایزوتروپ به پارامترهایی چون بار، زاویه‌ی جهت الیاف و ضخامت لایه بسیار حساس می‌باشد. بنابراین بهینه‌سازی چنین سازه‌ای با استفاده از یک شاخص قابلیت اطمینان به عنوان قید بهینه‌سازی مسأله‌ی بسیار مهمی می‌باشد.

گومز و همکاران در یک پژوهش نمونه، این مسأله را برای ورق‌های کامپوزیتی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و شبکه‌های

بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، بیشترین نیروی وارده بر قطعه در نظر گرفته و جهت بالا بردن قابلیت اطمینان¹ از ضریب اطمینان (معمولاً 1/5) استفاده می‌شود. در روش طراحی احتمالاتی²، کلیه‌ی فاکتورهای طراحی که دارای مقداری عدم اطمینان هستند به صورت یک متغیر تصادفی با تابع توزیع احتمال مناسب در نظر گرفته می‌شوند و با استفاده از ترکیب مفاهیم مهندسی و علم آمار، طراحی بهبود می‌یابد. در گذشته این روش به دلیل پیچیدگی و حجم بالای محاسبات، کمتر مورد استقبال طراحان قرار می‌گرفت. حال آنکه با توجه به پیشرفت روش‌های احتمالاتی در دنیا و ارتقاء نرم‌افزارهای مرتبط در سال‌های اخیر، ورود به این عرصه ضروری به نظر می‌رسد [1].

در چند دهه‌ی گذشته مطالعات متعددی بر روی قابلیت اطمینان کامپوزیت‌ها و کاربردهای مربوطه انجام شده‌است. پراکندگی آماری ذاتی در ویژگی‌های مواد و همچنین عملکرد مکانیکی پیچیده‌ی آن‌ها، باعث می‌شود که تحلیل قابلیت اطمینان در کامپوزیت‌ها مسأله‌ی مهمی به شمار رود.

هوآنگ و همکاران، قابلیت اطمینان یک مخزن کامپوزیتی تحت فشار داخلی را به کمک شبیه‌سازی مونت کارلو³ بررسی کردند. آن‌ها از روش المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، تخریب احتمالاتی این سازه‌ی کامپوزیتی را که دارای شکل و شرایط مرزی پیچیده‌ای بود، تحلیل کردند. در این پژوهش استحکام لایه‌ها به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شد [2].

اوکیل و همکاران اثرات ساختار الیاف پلیمری را روی قابلیت اطمینان تیرهای بتنی تقویت‌شده بررسی نمودند. آن‌ها اثرات مواد و عدم قطعیت مدل‌ها را در یک تابع حالت حدی مبتنی بر استحکام، محاسبه کردند و قابلیت اطمینان را با استفاده از روش مرتبه‌ی اول قابلیت اطمینان⁴ به دست آوردند [3].

آنتونیو و همکاران روشی را برای تحلیل عدم قطعیت‌های منتشر شده در مسأله‌ی بهینه‌سازی طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان⁵ برای ورق‌های کامپوزیتی ارائه دادند و از یک روش معکوس تحلیل قابلیت اطمینان بر طبق معیار خرابی تسای-وو⁶، برای دستیابی به سطح خاصی از قابلیت اطمینان استفاده نمودند و بار بیشینه را به وسیله‌ی تابعی بر حسب زاویه‌ی لایه استخراج کردند. آن‌ها از روش شبکه‌های عصبی⁷ و شبیه‌سازی

¹ Reliability

² Probabilistic Design Method

³ Monte Carlo Simulation (MCS)

⁴ First Order Reliability Method (FORM)

⁵ Reliability Based Design optimization (RBDO)

⁶ Tsai-Wu

⁷ Artificial Neural Network (ANN)

طراحی و بهینه‌سازی این گونه سازه به طور واضح مشخص شوند. لذا اسمیت و همکاران تحلیل قابلیت اطمینان را با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی مونت‌کارلو، روش مرتبه‌ی اول قابلیت اطمینان، نمونه برداری خطی و شبیه‌سازی زیر-مجموعه‌ای³ برای یک مدل یک بعدی از یک جاگیر در یک پنل ساندویچی ترکیب شده با آن، بر مبنای معیار خرابی تسای-وو، اجرا نمودند و مشاهده کردند که شبیه‌سازی زیرمجموعه‌ای برای استخراج احتمالات شکست کوچک بسیار مفید است، اما در حالت کلی نمونه‌گیری مونت‌کارلو مؤثرترین و کارآمدترین روش نسبت به روش‌های پیشرفته‌ی دیگر است، با وجود اینکه معیابی چون صرف زمان زیاد جهت شبیه‌سازی را شامل می‌شود [14].

ژو و همکاران روشی را برای تحلیل قابلیت اطمینان با روش مرتبه‌ی اول قابلیت اطمینان، برای کماتش پنل‌های کامپوزیتی تقویت‌شده ارائه دادند. در این پژوهش، پنل تقویت شده به بارگذاری‌های دوجبهته و در صفحه متصل هستند. آن‌ها متغیرهایی را که روی ایمنی سازه اثر بیش‌تری دارند با استفاده از عمل تحلیل حساسیت، مشخص و ارتباط بین اثرات نسبت ابعادی ورق و نسبت بارگذاری در صفحه را روی بار بحرانی کماتش به دست آوردند [15]. سای و همکاران نیز قابلیت اطمینان ورق‌های تقویت‌شده‌ای را که تحت اثر بارهای خارج از صفحه هستند، با استفاده از معیار خرابی تسای-وو و شبیه‌سازی مونت‌کارلو ارزیابی کردند و با نتایج حاصل از روش مرتبه‌ی اول و دوم، مستخرج از یک گزارش، مقایسه نمودند [16].

سلیمان و همکاران با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، تحلیل المان محدود یک مخزن کامپوزیتی تحت فشار داخلی را انجام دادند. در این پژوهش، یک شبیه‌سازی بر روی مخزن کامپوزیتی با آستری آلومینیوم که با الیاف کربن/اپوکسی پوشانده شده‌بود، صورت گرفت. به منظور بررسی تأثیر زاویه‌ی پیچش بر روی مخزن تحت فشار داخلی، از تحلیل المان محدود استفاده شد. همچنین فشار ترکیدگی، بیشینه جابجایی پوسته و زاویه پیچش بهینه نیز مورد مطالعه قرار گرفتند. در این تحقیق از معیارهای تخریب تسای-وو، تسای-هیل و تنش بیشینه برای تحلیل داده‌ها استفاده شد. نتایج به دست آمده با نتایج تجربی مقایسه شد و توافق خوبی بین آنها وجود داشت [17].

پاتل و همکاران ایمنی و قابلیت اطمینان صفحات کامپوزیتی را تحت تأثیر ضربه با سرعت کم و با استفاده از خصوصیات ماده و سرعت اولیه به عنوان پارامترهای تصادفی مورد مطالعه قرار دادند. صفحات کامپوزیتی تقویت شده با الیاف گرافیت در اثر

عصبی حل نمودند. قابلیت اطمینان را با استفاده از روش مرتبه‌ی اول قابلیت اطمینان و شبیه‌سازی مونت‌کارلو مبتنی بر معیار خرابی تسای-وو، ارزیابی نمودند و برای حل مسأله‌ی بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک و شبکه‌های عصبی استفاده کردند که در نهایت به این نتیجه رسیدند که روش توسعه داده‌ی خود بسیار دقیق و با کاهش حجم محاسبات همراه خواهد بود [10].

در ادامه روشی دیگر برای تخمین قابلیت اطمینان ورق‌های کامپوزیتی بر مبنای طراحی بهینه توسط لوپز و همکاران ارائه شد. روش آن‌ها مبتنی بر ضرایب ایمنی بود که به روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات¹ نیز متصل بود. آن‌ها تابع حالت حدی را با استفاده از یک ضریب تحت عنوان ضریب ایمنی کماتش فرموله کردند و در نهایت در عملیات بهینه‌سازی وزن ورق را کمینه کردند [11].

موتلی و همکاران اثرات عدم قطعیت‌ها را بر روی پاسخ و قابلیت اطمینان روتورهای کامپوزیتی بررسی نمودند. سازه‌های کامپوزیتی به عدم قطعیت‌های هندسه، مواد و بارگذاری به دلیل ساختار پیچیده‌ی خود، بسیار حساسیت دارند. هدف آن‌ها از پژوهش خود، کمی‌سازی اثرات این‌گونه عدم قطعیت‌ها روی ملخ کامپوزیتی و قابلیت اطمینان کلی سیستم بود [12].

کای و همکاران روش طراحی فاکتور بار و مقاومت بر اساس قابلیت اطمینان را برای یک مخزن کامپوزیتی تحت فشار هیدرواستاتیک خارجی که متعلق به یک زیرریایی بود، به کار گرفتند. آن‌ها از معیار تخریب کماتش استفاده کردند. آن‌ها همچنین به منظور بررسی تأثیر مشخصه‌های آماری بر روی نتایج، یک حساسیت‌سنجی نیز انجام دادند. نتایج نشان داد که مدول طولی، شعاع داخلی لایه‌های کامپوزیت و فشار خارجی به طور قابل توجهی بر نتایج طراحی تأثیر می‌گذارند، در حالی که پارامترهایی چون مدول عرضی، نسبت پواسون، مدول برشی و زاویه‌ی پیچش اثرات کمی دارند. به منظور تأیید نتایج طراحی، روی یک مخزن کامپوزیتی تحت فشار داخلی آزمایش کماتش انجام شد. مشاهده شد که وقتی فشار هیدرواستاتیک خارجی اعمال شده کمی بیشتر از فشار کماتش بحرانی طراحی شده باشد، کماتش و متعاقب آن انفجار رخ می‌دهد که این توافق خوبی را بین نتایج تجربی و تحلیلی نشان می‌دهد [13].

به جهت انتقال بار در یک سازه‌ی کامپوزیتی ساندویچی معمولاً از اتصالات توکار² استفاده می‌شود. واضح است که عدم قطعیت‌های خواص مکانیکی مواد ترکیب‌شده باید در مراحل

¹ Particle Swarm Optimization (PSO)

² Insert

³ Subset

جدول 1 مشخصات هندسی مخزن کامپوزیتی [22]

Table 1 Geometrical specifications of composite vessel [22]

ضخامت (mm)	زاویه پیچش (درجه)
2/1	90
0/87	12
0/87	15
0/87	19
2/1	90
0/87	22
0/87	27
0/87	32
0/6	38
0/54	90

جدول 2 خواص مکانیکی مواد [22]

Table 2 Mechanical properties of materials [22]

خواص	مواد	
	T700/Epoxy	AL6061
E_1 (GPa)	141	70
E_2 (GPa)	11/4	-
ν_{12}	0/28	0/32
G_{12} (MPa)	7/1	-

جدول 3 استحکام اولیه لایه های کامپوزیت [22]

Table 3 Initial strengths of composite layers [22]

مقدار (MPa)	پارامتر
2500	استحکام کششی در جهت الیاف X_T
2500	استحکام فشاری در جهت الیاف X_C
60	استحکام کششی در جهت عمود بر الیاف Y_T
2500	استحکام فشاری در جهت عمود بر الیاف Y_C
85	استحکام برشی S_{12}

با توسعه‌ی یک کد در نرم‌افزار متلب، تنش‌های توزیع شده در بخش کامپوزیتی مخزن مورد مطالعه با استفاده از روش کلاسیک لایه‌چینی استخراج می‌گردند. فشار هیدرواستاتیکی داخلی منجر به ایجاد تنش‌های یکنواختی در جداره‌ی مخزن می‌گردند که این تنش‌ها مستقل از محل قرارگیری سطح مقطع در طول بخش استوانه‌ای مخزن می‌باشد. روابط الاستیسیته‌ی استوانه‌ی جدار نازک بر بخش استوانه‌ای مخزن حاکم بوده و می‌توان از تنش شعاعی در این بخش در برابر تنش محیطی صرف نظر نمود. تنش محیطی ناشی از فشار داخلی سیال توسط رابطه‌ی (1) به شرح ذیل محاسبه می‌شود:

$$\sigma_h = \frac{pr}{t} \quad (1)$$

ضربه توسط اجسام خارجی و در بارگذاری صفحه‌ای مستعد آسیب هستند. به منظور ارزیابی ظرفیت حمل بار ایمن و احتمال خرابی در اثر ضربه، تجزیه و تحلیل دینامیکی صفحه کامپوزیت تحت تأثیر ضربه با سرعت کم انجام شد. برای این منظور از روش المان محدود استفاده شد. تجزیه و تحلیل احتمالی و پیش بینی قابلیت اطمینان سیستم با استفاده از روش سطح پاسخ گاوسی انجام شد و اعتبارسنجی مساله با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو صورت گرفت [18].

لیپخین و همکاران طی پژوهشی استحکام، طول عمر و قابلیت اطمینان یک مخزن فلز- کامپوزیتی را تحلیل کردند. تجزیه و تحلیل انجام شده با استفاده از مدل های توسعه یافته و نتایج تجربی نشان دهنده عملکرد بالای سازه‌ی مورد مطالعه بود [19].

رفیعی و ترابی فشار ترکیدگی مخازن کامپوزیتی تحت فشار داخلی را با در نظر گرفتن عدم قطعیت تولید پیش بینی کردند. ابتدا تخریب لایه اول مخازن کامپوزیتی با/ بدون آستری را با در نظر گرفتن معیارهای مختلف خرابی بررسی کردند. سپس فشار ترکیدگی مخازن را با استفاده از مدل آسیب پیش‌رونده بر اساس رویکرد مکانیک آسیب پیوسته به صورت قطعی پیش‌بینی کردند. در نهایت، یک مدل سازی تصادفی برای برآورد فشار ترکیدگی مخازن تحت فشار داخلی با در نظر گرفتن کسر حجمی الیاف، زاویه‌ی پیچش و خواص مکانیکی و استحکام به عنوان پارامترهای تصادفی صورت گرفت [20].

ذوالفقاری و ایزدی مدل جدیدی مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی پیشنهاد و توسعه دادند. پارامترهای ورودی مدل شامل قطر داخلی و خارجی، ضخامت، استحکام نهایی و تسلیم و خروجی فشار ترکیدگی است. نتایج به دست آمده نشان داد که مدل مورد مطالعه، پتانسیل خوبی برای استفاده به عنوان مدلی کاربردی تر در مقایسه با مدل‌های فعلی در طراحی مخازن تحت فشار دارد [21].

2- تحلیل تنش مخزن

مخزن مورد نظر قطر 185 میلی‌متر داشته، رویه‌ی آستری آن از جنس آلومینیوم و با ضخامت 2/5 میلی‌متر می‌باشد. چینش لایه‌های کامپوزیت از جنس کربن/ اپوکسی که بر روی رویه‌ی آستری پیچانده شده‌اند، در جدول 1 معرفی شده‌اند. خواص مکانیکی مواد کامپوزیتی مخزن مورد مطالعه در جدول 1 و خواص استحکامی مواد کامپوزیتی در جدول 2 نمایش داده شده است.

به 90 درجه داراست. پس از تنش کششی عرضی، تنش برشی بیشترین نقش را در تخریب مخازن ایفا می‌کند. با افزایش زاویه‌ی الیاف تا رسیدن به زاویه‌ی پیچش محیطی نقش مؤلفه‌ی تنش برشی به طور کامل حذف و تنها مؤلفه‌های تنش عرضی و طولی در تخریب مؤثر هستند. از آنجایی که مؤلفه‌ی تنش طولی در مقایسه با استحکام لایه‌ی کامپوزیت در راستای الیاف مقدار قابل توجهی ندارد، این مؤلفه نیز در تخریب مخزن نقش بارزی ایفا نمی‌کند.

طبق نتایج به دست آمده در زوایای پیچش نزدیک به 55 درجه با توجه به اینکه هر دو مؤلفه‌ی تنش کششی عرضی و برشی دارای مقدار می‌باشند به همین جهت است که معیارهای تخریبی که ویژگی تعاملی بودن را دارند عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند. معیارهای تخریب کرنش مینا نظیر معیار تخریب حداکثر کرنش و معیار هارت اسمیت در این زوایای پیچش قادر به پیش بینی فشار تخریب قوی‌تری نسبت به زوایای پیچش محیطی می‌باشند. این در حالی است که برای زوایای پیچش محیطی و نزدیک به آن، کرنش مخزن تحت فشار کمتر از اندازه‌ای است که به وسیله‌ی معیار ماکزیمم کرنش پیش‌بینی می‌شود. بنابراین رفتار کرنشی مخزن نمی‌تواند به خوبی معیار مناسبی برای پیش‌بینی فشار تخریب اولین لایه باشد.

با توجه به روابط معیارهای تنش مینا، مبرهن است که در تمامی این معیارها زمانی که تنش کششی عرضی برابر استحکام عرضی و یا مؤلفه‌ی تنش برشی برابر استحکام برشی لایه‌ی کامپوزیت شود، تخریب توسط این معیارها گزارش می‌شود. این در حالیست که این پیش‌بینی تخریب بسیار محتاطانه بوده و تخریب در سطح تنش بالاتر از استحکام کششی رخ می‌دهد. در این محدوده زاویه‌ی پیچش الیاف، معیارهای حداکثر تنش و هشین از عملکرد خوبی برخوردار بوده و فشار تخریب را با دقت قابل قبولی گزارش می‌کنند.

در زوایای پیچش الیاف محیطی و نزدیک به 90 درجه تأثیر مؤلفه‌ی تنش برشی از بین رفته و تنها مؤلفه‌ی تنش کششی عرضی در تخریب لایه نقش ایفا می‌کند. در این محدوده زاویه‌ی پیچش معیارهای تخریب تنش مینا عملکرد بسیار خوبی دارند به گونه‌ای که فشار تخریب در مخازن تحت فشاری که زاویه‌ی پیچش الیاف در آن‌ها در این محدوده است با دقت بالا پیش‌بینی می‌کنند. از انطباق نتایج حاصل از این معیارها با نتایج آزمایشگاهی می‌توان به این مهم پی برد که با توجه به اینکه مؤلفه‌ی تنش کششی عرضی در این محدوده زاویه‌ی پیچش الیاف، عامل تخریب بوده و سایر مؤلفه‌های تنش در تخریب نقش

کدر آن p فشار داخلی سیال، r شعاع بخش استوانه‌ای مخزن و t ضخامت مخزن می‌باشند. در مخازن دارای آستری با استفاده از شرط تعادل نیروها در راستای محیطی طبق رابطه (2) خواهیم داشت:

$$\sigma_h t = \sigma_h^{Liner} t_{Liner} + \sigma_h^{FRP} t_{FRP} \quad (2)$$

در مخازن کامپوزیتی دارای آستری برای آن که لایه‌ی کامپوزیت، اتصال خود را با جداری آستری حفظ نماید، فرض می‌شود کرنش جداری آستری و لایه‌ی کامپوزیت با هم برابر باشند، لذا خواهیم داشت:

$$\varepsilon_h^{FRP} = \varepsilon_h^{Liner} \Rightarrow \frac{\sigma_h^{FRP}}{E_{FRP}} = \frac{\sigma_h^{Liner}}{E_{Liner}} \quad (3)$$

با درست بودن تنش میانگین اعمال شده به لایه‌های کامپوزیت، با استفاده از تئوری کلاسیک لایه‌چینی، تنش‌های اعمال شده به هر لایه قابل محاسبه می‌باشد.

2-1- بررسی تخریب اولین لایه

پس از بررسی و استخراج وضعیت تنش‌ها در لایه‌ها، ارزیابی تخریب بر روی بحرانی‌ترین لایه باید انجام شود تا مشخص گردد اولین لایه در چه فشاری تخریب را تجربه می‌کند. برای این منظور استفاده از معیار تخریب مناسب اهمیت دارد. تا کنون تئوری‌ها و معیارهای تخریب مختلفی برای پیش‌بینی آغاز تخریب کامپوزیت‌ها پیشنهاد شده‌اند. این معیارهای تخریب بر اساس مؤلفه‌های تنش یا کرنش، مدهای آسیب مختلفی را با توجه به مکانیزم‌های مختلف آسیب نظیر تخریب الیاف، کماتش الیاف، ترک خوردگی ماده‌ی زمینه و تخریب برشی مشخص می‌کنند. تقسیم‌بندی‌های مختلفی برای معیارهای تخریب وجود دارد، از جمله تقسیم‌بندی معیارهای تخریب می‌توان به دو گروه غیرتعاملی¹ و تعاملی² اشاره کرد [23]. در معیارهای تخریب غیرتعاملی، فرض می‌شود هیچ‌گونه برهم‌کنشی بین مؤلفه‌های تنش یا کرنش وجود نداشته‌باشد و این مؤلفه‌ها به طور جداگانه با مقدار متناظر استحکام مقایسه شوند، در حالی که معیارهای تعاملی با برهم‌کنش بین مؤلفه‌های تنش‌ها یا کرنش‌ها لحاظ می‌نمایند.

در یک مخزن تحت فشار تمامی المان‌های پوسته‌ای مخزن در راستاهای محیطی و محوری تحت کشش بوده و در تئوری‌های تخریب مورد استفاده این مهم مورد توجه قرار گرفته‌است. طبق نتایج حاصل از تحلیل تنش، بیشترین نقش در تخریب مخزن را مؤلفه‌ی تنش عرضی در زوایای پیچش الیاف محیطی و نزدیک

¹ Non-interactive

² Interactive

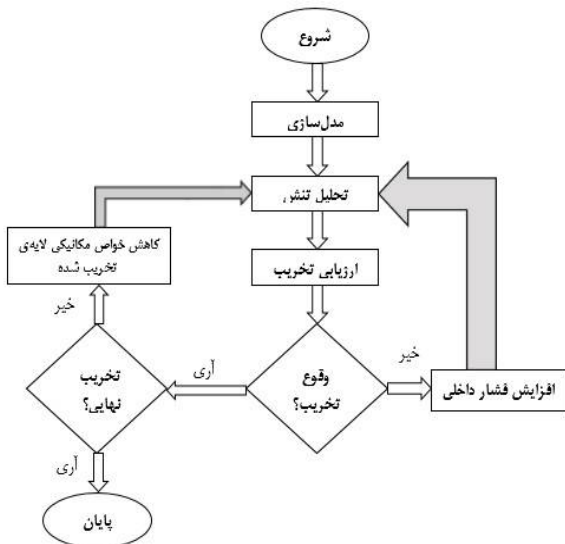


Fig. 1 Flowchart of progressive damage modeling

شکل 1 روند کلی مدل سازی پیش بینی فشار تخریب

در روش پیش بینی فشار تخریب به روش تخفیف لایه ای پس از تشخیص وقوع تخریب در هر لایه، لایه ای تخریب شده با لایه ای سالم اما با خصوصیات مکانیکی ضعیف تر جایگزین می گردد. این رویکرد دامنه ای وسیعی از روش های تقلیل خواص کامپوزیت ها را شامل می شود. روش های تخفیف لایه ای به علت عدم نیاز به حجم محاسبات بالا از مقبولیت مناسبی در تحلیل های مهندسی بعلاوه زمان کم اجرا و دقت مناسب برخوردار شده اند [24]. در این پژوهش از قوانین ذکر شده در جدول 4 و 5 برای کاهش خواص مکانیکی لایه تخریب شده و بر اساس منطق پدیده شناختی حالت تخریب استفاده شده است [25]. در این قوانین، تنها خواص موثر و اساسی مربوط به هر حالت تخریب به طور کامل تقلیل داده می شوند و سایر خواص به این دلیل که هنوز لایه قابلیت باربری دارد؛ کاهش نمی یابد. در حالت تخریب فاجع آمیز در جهت الیاف، به این دلیل که لایه مذکور دیگر قابلیت تحمل بار ندارد؛ به طور کامل دچار کاهش خواص می شود.

لازم به ذکر است برای تخمین فشار تخریب نهایی مخزن کامپوزیتی، از مطالعه آزمایشگاهی ونگ و همکارانش استفاده می شود [22]. مخزن کامپوزیتی کربن/ اپوکسی با آستری از جنس آلومینیم با قطر داخلی 185 میلی متر را تحت فشار داخلی قرار دادند و فشار تخریب نهایی مخزن کامپوزیتی را 95 مگاپاسکال گزارش کردند. نتیجه ای مدل سازی در جدول 6 آمده است. آزمایش در دمای اتاق و با نرخ افزایش فشار 0/2 مگاپاسکال بر ثانیه صورت گرفته است.

به سزایی ایفا نمی کنند، بررسی تخریب بر مبنای استحکام کششی عرضی و مؤلفه های تنش کششی عرضی در معیارهای تنش مبنای پیش بینی دقیق تری از فشار تخریب اولین لایه در مخازن تحت فشار ارائه می دهد. در میان تئوری های تنش مبنای در زوایای پیچش نزدیک به 60 درجه معیارهای تخریبی مانند هشین و هافمن که در روابط آن ها تعامل بین مؤلفه های تنش وجود دارد پیش بینی دقیق تری دارند.

لذا با توجه به در نظر گرفتن تمامی جوانب از جمله دقت معیار در پیش بینی فشار تخریب، تعیین حالت تخریب، خطای ثابت معیار تخریب برای تمامی زوایای پیچش الیاف در مخزن کامپوزیتی و تعاملی بودن معیار تخریب می توان معیار تخریب هشین را برای پیش بینی فشار تخریب اولین لایه در مخازن کامپوزیتی برگزید. لازم به ذکر است با توجه به نتایج به دست آمده، فشار تخریب لایه ای اول مخزن مورد مطالعه، 37 مگاپاسکال بوده و تخریب در لایه ای دوم یعنی زاویه ای 12 درجه و در جهت عمود بر الیاف اتفاق می افتد.

2-2- فشار تخریب نهایی

در قسمت قبل فشار تخریب اولین لایه در مخازن کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفت، در حالی که سایر لایه ها هنوز قابلیت باربری دارند. در این قسمت پس از شناسایی تخریب اولین لایه، مدل سازی ادامه می یابد و تا زمانی که تمامی لایه ها تخریب گردند، پیش می رود و با تخریب آخرین لایه، مدل سازی متوقف و فشار متناظر با آن به عنوان فشار ترکیدگی گزارش می گردد. در حقیقت فشار ترکیدگی معرف حد نهایی تحمل بار مخزن می باشد. مدل سازی پیش بینی فشار تخریب از سه جزء اصلی تحلیل تنش، ارزیابی تخریب و کاهش خواص مکانیکی تشکیل شده است که این روند کلی در شکل 1 نمایش داده شده است. طبق الگوریتم شکل 1 بعد از ساخت مدل، تحلیل تنش صفحه ای کامپوزیتی انجام می شود، پس از آن با استفاده از معیارهای تخریب، وقوع تخریب بررسی می شود. چنانچه تخریب در هر یک از لایه های صفحه رخ داده باشد، خواص کاهش یافته و دوباره تحلیل تنش صورت می گیرد. در غیر این صورت بار وارد بر صفحه ای کامپوزیتی افزایش می یابد. این فرآیند تا کاهش خواص تمامی لایه ها و وقوع تخریب نهایی ادامه می یابد. تحلیل تنش با استفاده از تئوری کلاسیک لایه چینی و با بهره گیری از نرم افزار متلب انجام می شود. ارزیابی تخریب در هر لایه نیز توسط قانون هشین صورت می گیرد. برای کاهش خواص مکانیکی، روش تخفیف لایه ای مد نظر قرار گرفته است.

روش بین هفت تا ده دقیقه است. شایان ذکر است که در تحلیل صورت گرفته، تنش القاء شده در لایه آستری نیز مورد بررسی واقع گردید (σ_h^{Liner} در رابطه 2) و مشاهده گردید که همواره از استحکام تسلیم آلومینیوم 6061 مگاپاسکال کمتر بود.

3- مدل سازی تصادفی

در حین تولید مخازن کامپوزیتی به روش پیچش الیاف، امکان کنترل دقیق و ثابت نگه داشتن پارامترهایی همانند کسر حجمی و زاویه پیچش، بر روی مقادیر نامی که در فرآیند طراحی مشخص می‌شوند، از لحاظ عملی وجود ندارد و تغییرات پارامترهای مذکور می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی فشار تخریب مخازن کامپوزیتی داشته‌باشد. برای این منظور پیش‌بینی فشار تخریب با در نظر گرفتن این عدم قطعیت‌ها صورت می‌گیرد. در این قسمت، مدل سازی تصادفی اجرا می‌گردد و از روش مونت کارلو استفاده می‌شود [26]. در قالب این روش، یک مسأله چندین مرتبه حل می‌شود و تغییرپذیری پاسخ به وسیله روابط ساده آماری محاسبه می‌شود. به علت نیرومندی و سادگی آن، روش شبیه سازی مونت کارلو اکثراً در مقالات به عنوان یک روش مرجع برای بررسی دقت سایر روش‌ها استفاده می‌شود و گاهی اوقات با روش‌های دیگر موجود در این حوزه مقایسه می‌شود [27].

اولین پارامتر متغیر در این بررسی احتمالی زاویه الیاف می‌باشد. به هنگام تولید مخازن کامپوزیتی به علت لغزیدن الیاف بر روی لایه پیچیده شده قبلی در زوایای نزدیک به پیچش محوری، الیاف به صورت دقیق پیچیده نمی‌شوند و زاویه پیچش الیاف دارای خطا می‌باشد. بنابراین در پیچش لایه‌ها به جز لایه‌هایی که پیچش الیاف به صورت محیطی است، خطای $\pm 2/5$ درجه‌ای به صورت تصادفی در نظر گرفته می‌شود. یعنی زاویه پیچش لایه‌های غیرمحیطی می‌تواند از مقدار نامی خود حداکثر یا حداقل به میزان $+2/5$ یا $-2/5$ درجه منحرف گردد. لذا زاویه پیچش هر لایه در بازه $[\theta - 2.5^\circ, \theta + 2.5^\circ]$ به صورت تصادفی انتخاب می‌گردد. شایان ذکر است که انتخاب زاویه پیچش واقعی برای هر لایه مستقل از سایر لایه‌ها صورت می‌پذیرد. بنابراین تمامی لایه‌ها از یک الگوی تصادفی تبعیت می‌نمایند. تعیین میزان خطا به وسیله کد در نرم افزار متلب تعیین می‌شود و خطای زاویه الیاف هر لایه مستقل از سایر لایه‌هاست.

دومین متغیر تصادفی که در این بررسی احتمالی در نظر گرفته می‌شود، کسر حجمی الیاف می‌باشد. با توجه به اینکه در

جدول 4 قوانین کاهش خواص مکانیکی در شکل مدهای مختلف تخریب لایه [25]

Table 4 Mechanical properties degradation rules for different failure modes [25]

خواص مکانیکی کاهش یافته				نوع تخریب لایه
E_1	E_2	G_{12}	ν_{12}	
0	0	0	0	تخریب الیاف در کشش
0	0	0	0	تخریب الیاف در فشار
E_1	0	G_{12}	ν_{12}	تخریب ماده زمینه در کشش
E_1	0	G_{12}	ν_{12}	تخریب ماده زمینه در فشار
E_1	E_2	0	0	تخریب برشی در صفحه

جدول 5 قوانین کاهش استحکام در شکل مدهای مختلف تخریب لایه [25]

Table 5 Strength properties degradation rules for different failure modes [25]

استحکام‌های کاهش یافته					نوع تخریب لایه
X_T	X_C	Y_T	Y_C	S_{12}	
0	0	0	0	0	تخریب الیاف در کشش
0	0	0	0	0	تخریب الیاف در فشار
X_T	X_C	0	Y_C	S_{12}	تخریب ماده زمینه در کشش
X_T	X_C	Y_T	0	S_{12}	تخریب ماده زمینه در فشار
X_T	X_C	Y_T	Y_C	0	تخریب برشی در صفحه

جدول 6 فشار تخریب مخزن کامپوزیتی

Table 6 Failure pressure of composite vessel

مطالعه آزمایشگاهی (MPa)		95
روش تخفیف لایه‌ای	کد توسعه یافته در پژوهش	80/5
ارتقا یافته (MPa)	فعلی	(-15%)
(خطا)	تحلیل المان محدود [20]	99
		(+5%)

نتایج بررسی رفیعی و ترابی بر روی این مخزن نیز در جدول 6 درج گردیده است. همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، آنها با بهره‌گیری از روش المان محدود، فشار ترکیدگی مخازن کامپوزیتی تحت فشار داخلی را با در نظر گرفتن عدم قطعیت تولید و با استفاده از مدل آسیب پیش‌رونده بر اساس رویکرد مکانیک آسیب پیوسته به صورت قطعی پیش‌بینی کردند [20].

با مقایسه‌ی نتایج حاصل از کدنویسی در متلب و روش المان محدود و مقایسه‌ی آنها با داده‌ی تجربی، مشاهده می‌شود که روش به کار گرفته‌شده در این پژوهش دقت مناسبی دارد. با توجه به اینکه، توسعه یک ابزار سریع و ساده برای تخمین فشار تخریب مدنظر می‌باشد؛ روش فعلی با تخمین دست پایین نتایج و میزان خطای گزارش شده، برای این تحقیق مناسب می‌باشد. قطعاً استفاده از روش المان محدود جواب دقیق‌تری می‌دهد ولی نسبت به این روش زمان‌بر است. زمان مورد نیاز برای اجرای این

نسبت منظری است و مقدار آن از رابطه $\frac{2l}{D}$ به دست می‌آید که l و D به ترتیب طول و قطر الیاف می‌باشند. مدول یانگ طولی (در جهت الیاف) و ضریب پواسون اصلی برای هر لایه با استفاده از قانون اختلاط محاسبه می‌گردد [29]:

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (6)$$

$$v_{12} = v_f V_f + v_m V_m$$

در رابطه (4)، E_f ، E_m ، V_f و V_m به ترتیب مدول الیاف، مدول رزین کسر حجمی الیاف و کسر حجمی رزین می‌باشند. برای محاسبه‌ی استحکام اولیه‌ی لایه‌های کامپوزیت نیز مطابق روابط (7) الی (10) عمل شده است [25]:

$$X_T = X_f \left(V_f + V_m \frac{E_m}{E_f} \right) \quad (7)$$

$$X_C = 0.5 X_T \quad (8)$$

$$Y_T = V_m X_m \quad (9)$$

$$Y_C = V_m X'_m \quad (10)$$

در روابط (7) الی (10)، X_T ، X_C ، X_f ، X'_m ، X_m ، Y_T و Y_C به ترتیب معادل استحکام کششی ماتریس، استحکام فشاری ماتریس، استحکام الیاف، استحکام کششی در جهت الیاف، استحکام فشاری در جهت الیاف، استحکام کششی در جهت عمود بر الیاف و استحکام فشاری در جهت عمود بر الیاف می‌باشد. بنابراین همان‌طور که مشاهده می‌گردد، پس از انتخاب تصادفی کسر حجمی، کلیه‌ی خواص استحکامی و مکانیکی لایه‌ها نیز به صورت تصادفی تخمین زده می‌شوند. خواص مکانیکی الیاف و رزین در جدول 7 ارائه شده است.

جدول 7 خواص مکانیکی الیاف و رزین

Table 7 Mechanical properties of fiber and resin

رزین اپوکسی	الیاف T700/Carbon	خواص
3/2	230	مدول الاستیک (GPa)
60-70	4800	استحکام کششی (MPa)
140	-	استحکام فشاری (MPa)

با توجه به عدم تغییرات جدی استحکام برشی در بازه کسر حجمی الیاف بین 50 الی 60 درصد، مقدار آن در بازه مذکور به صورت ثابت معادل 85 مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. به این ترتیب در هر مرحله زاویه‌ی الیاف و کسر حجمی برای هر لایه به صورت تصادفی انتخاب می‌گردد سپس خواص مکانیکی و استحکامی محاسبه می‌شود و مدل تولید می‌شود. در مرحله‌ی بعد پیش‌بینی فشار ترکیدگی صورت گرفته و این روند تا همگرایی نتایج ادامه می‌یابد.

تولید مخازن کامپوزیتی به روش پیچش الیاف، از ظرف رزین الیاف عبور کرده و به رزین آغشته می‌شوند و پس از پیچاندن، رزین اضافی هر لایه در اثر فشار لایه‌های بالاتر به سمت بیرون حرکت می‌کند، این فرآیند تولید موجب می‌شود تا کسر حجمی از لایه‌های داخلی به سمت لایه‌های بیرونی کاهش یابد. بر اساس تجارب تولیدی، کسر حجمی الیاف بین 50 الی 60 درصد فرض شده است. اولین قید اعمال شده برای کسر حجمی تمامی لایه‌های مخزن این است که میانگین کسر حجمی تمامی لایه‌ها برابر کسر حجمی کل سازه باشد. برای این منظور کد نوشته شده در نرم‌افزار متلب، کسر حجمی لایه‌ها را با این قید که میانگین تمامی کسر حجمی‌های مشخص شده برابر کسر حجمی اولیه‌ی مخزن باشد تعیین می‌کند. پس از تعیین کسر حجمی‌های تصادفی برای لایه‌ها دومین قید اعمال می‌شود و کسر حجمی‌های مذکور را به صورت نزولی از لایه‌های داخلی مخزن به سمت لایه‌های خارجی مخزن مرتب می‌شوند. با توجه به انتخاب کسر حجمی به صورت تصادفی، قطعاً خواص مکانیکی و استحکامی نیز به صورت تصادفی تغییر خواهند کرد. لذا می‌توان عنوان کرد که در این تحقیق کسر حجمی، زاویه‌ی پیچش الیاف، خواص مکانیکی و خواص استحکامی به صورت تصادفی تخمین زده می‌شوند.

3-1- تعیین خواص مکانیکی

پس از تعیین کسر حجمی هر لایه، خواص و استحکام متناسب با آن، توسط قوانین میکرومکانیک مناسب محاسبه و اعمال می‌شود. برای محاسبه‌ی مدول عرضی از قانون هالپین - تسای¹ استفاده می‌گردد [28]:

$$E_2 = E_m \left[\frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \right]$$

$$\eta = \frac{E_f}{E_m} - 1, (\xi = 2) \quad (4)$$

قانون هالپین - تسای برای محاسبه‌ی مدول برشی نیز طبق رابطه‌ی (6) مورد استفاده قرار می‌گیرد [30]:

$$G_{12} = E_m \left[\frac{1 + \xi \eta_G V_f}{1 - \eta_G V_f} G_m \right]$$

$$\eta_G = \frac{G_f}{G_m} - 1, (\xi = 1) \quad (5)$$

در رابطه (6)، E_{xy} مدول برشی لایه‌ی کامپوزیتی، G_f و G_m به ترتیب مدول برشی الیاف و رزین می‌باشد. ξ نیز همان

¹ Halpin-Tsai

2-3- نتایج تحلیل تصادفی مخزن کامپوزیتی

معیار همگرایی نتایج، رسیدن به مقدار ثابتی برای ضریب تغییرات داده‌های آماری فشار تخریب مخزن می‌باشد. یعنی پس از هر بار اجرا، میانگین نتایج و انحراف معیار نتایج تا آن زمان برای فشار تخریب محاسبه می‌گردد و سپس روند ضریب تغییرات که از تقسیم انحراف معیار به میانگین حاصل می‌شود، بررسی می‌گردد. ثابت شدن مقدار ضریب تغییرات پس از چندین اجرای تصادفی مؤید کفایت نمونه‌ی تصادفی تولید شده است. پس از پیش‌بینی فشار تخریب مخزن کامپوزیتی با در نظر گرفتن پارامترهای تصادفی، نتایج طبق جدول 8 حاصل می‌شود. مقدار میانگین فشار تخریب پس از 100 مرتبه تکرار پیش‌بینی فشار با دو پارامتر تصادفی نزدیک به 83 مگاپاسکال می‌باشد. همچنین بالاترین تکرار فشار تخریب در این پیش‌بینی‌های صورت گرفته، فشار تخریب 82 مگاپاسکال است.

نتایج نشان می‌دهد چنانچه پارامترهایی نظیر زاویه‌ی الیاف و کسر حجمی که کنترل آن در فرآیند تولید امری دشوار و همواره همراه با خطاست، در بازه‌ای به صورت تصادفی تغییر کنند، چه میزان بر روی فشار تخریب تأثیرگذار خواهند بود. همچنین نتایج بررسی آماری نشان از نزدیک شدن فشار تخریب مخزن به نتایج آزمایش دارد که می‌تواند به دلیل در نظر گرفتن پارامترهای عدم قطعیت بر تولید مخزن باشد. همانطور که مشاهده می‌گردد، فشار تخریب پیش‌بینی شده به روش مدل‌سازی قطعی به میزان 15% کمتر از فشار تخریب ناشی از مطالعه آزمایشگاهی است. این میزان اختلاف، با انجام مدل‌سازی تصادفی به 12% کاهش می‌یابد. اما به هر حال شیوه، مدل‌سازی فعلی به علت انجام تحلیل تنش با شیوه تئوری لایه‌چینی کلاسیک، نسبت به تحلیل المان محدود خطای بیشتری خواهد داشت. شیوه مدل‌سازی استفاده شده

جدول 8 فشار تخریب حاصل از پیش‌بینی تصادفی

Table 8 Stochastic prediction of failure pressure	
95	مشاهده آزمایشگاهی
80/5 (%15)	پیش‌بینی قطعی (خطا)
83 (%12)	میانگین (خطا)
78 (%17)	کمینه (خطا)
89 (%6)	بیشینه (خطا)
82 (%13)	غالب (خطا)
3/19	انحراف معیار

در این پژوهش به علت سرعت بسیار بالای اجرا و همچنین تخمین محافظه کارانه فشار تخریب، برای هدف مطالعه قابلیت

اطمینان مناسب می‌باشد. در مطالعه‌ی تصادفی صورت گرفته تغییرات پارامتر تصادفی کسر حجمی نسبت به زاویه‌ی الیاف تأثیر بیشتری بر نتایج فشار پیش‌بینی تخریب مخزن می‌گذارد. از جمله دلایل این میزان تأثیرگذاری می‌توان به تغییرات خواص مکانیکی و استحکامی لایه‌های کامپوزیت در اثر تغییر کسر حجمی اشاره کرد.

4- بررسی قابلیت اطمینان مخزن کامپوزیت

در این بخش، قابلیت اطمینان هر یک از اجزاء چندلایه‌ی کامپوزیتی با استفاده از روش مرتبه‌ی اول قابلیت اطمینان استخراج شده و در نهایت صحت‌سنجی نتایج به کمک شبیه‌سازی مونت کارلو صورت گرفته‌است. با استفاده از روش مرتبه‌ی اول قابلیت اطمینان، احتمال شکست محاسبه می‌شود که یکی از روش‌های قابل استفاده برای تخمین شاخص قابلیت اعتماد (β) می‌باشد [31]. روش‌های مبتنی بر نمونه‌گیری تصادفی مانند روش مونت کارلو، علی‌رغم دقت بالایی که دارند بسیار زمان‌بر هستند، در صورتیکه روش مرتبه اول قابلیت اطمینان در مدت زمان کم‌تری به جواب می‌رسد و از آنجایی که ما به دنبال ابزار سریعی جهت بررسی قابلیت اطمینان هستیم و همچنین با توجه به نوع مسأله‌ی حاضر، این روش مناسب‌تر است. اولین و مهم‌ترین گام برای تحلیل قابلیت اطمینان سازه، تعیین تابع عملکرد است. در مسأله‌ی حاضر، با توجه به مکانیزم خرابی سازه که به صورت تخریب ماتریس و الیاف در نظر گرفته شده‌است، تابع عملکرد به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$G_f = 1 - [F_{xx}\sigma_x^2 + F_x\sigma_x]$$

$$G_m = 1 - [F_{xx}\sigma_x^2 + F_{yy}\sigma_y^2 + F_{ss}\sigma_s^2 + 2F_{xy}\sigma_x\sigma_y + F_x\sigma_x + F_y\sigma_y] \quad (11)$$

که در این روابط:

$$F_{xx} = \frac{1}{X_T X_C} \quad F_{yy} = \frac{1}{Y_T Y_C} \quad F_{ss} = \frac{1}{S^2}$$

$$F_x = \frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_C} \quad F_y = \frac{1}{Y_T} - \frac{1}{Y_C} \quad F_{xy} = -\frac{1}{2} \sqrt{F_{xx} \cdot F_{yy}} \quad (12)$$

در روابط (11) و (12)، X_T, X_C, Y_T, Y_C, S به ترتیب بیانگر استحکام برشی، استحکام فشاری و کششی در راستای عمود بر الیاف و استحکام فشاری و کششی در راستای الیاف و نیز بیانگر تنش‌های اعمالی است. استحکام لایه‌ها و خواص ماده شامل مدول یانگ الیاف E_f و مدول یانگ ماده‌ی زمینه E_m به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده‌اند. به منظور تحلیل قابلیت اطمینان و در واقع محاسبه‌ی

ماده‌ی زمینه در لایه‌ی دوم یعنی لایه با زاویه‌ی 12 درجه دارای بیشترین مقدار است و بیشترین احتمال تخریب الیاف مربوط به بیرونی‌ترین لایه یعنی لایه با زاویه‌ی 90 درجه است. در ادامه برای تأیید نتایج از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده می‌شود. در این روش، در مرحله‌ی اول، با فرض اینکه تنش اعمالی خارجی دارای توزیع نرمال است، بر اساس مدل‌سازی معکوس، مقدار تصادفی آن تولید شده و بر اساس آن میزان تنش اعمال شده درون سازه محاسبه می‌شود و مقدار تنش با مقدار استحکام که آن هم به صورت تصادفی بر اساس مدل‌سازی معکوس محاسبه شده، مقایسه می‌شود. این سیکل 20.000 بار تکرار شده (40.000 عدد تصادفی تولید شده) و بر اساس تعداد حالاتی که استحکام کمتر از تنش بوده و تخریب رخ داده است، احتمال شکست هر لایه محاسبه می‌شود. برای نمونه مقدار احتمال تخریب ماده‌ی زمینه لایه‌ی 12 درجه در روش مونت کارلو، عدد 0/97 به دست آمد که با مقایسه با نتیجه به دست آمده از روش مرتبه‌ی اول، مقداری قابل قبول است. و برای بقیه لایه‌ها نیز با اختلاف قابل قبولی مقادیر احتمالی تخریب به دست آمد.

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تخریب مخزن کامپوزیتی تحت فشار داخلی و از جنس کربن/اپوکسی و بررسی قابلیت اطمینان، بررسی شده است. ابتدا با توسعه‌ی برنامه‌ای در نرم‌افزار متلب، تحلیل تنش صورت گرفت و با بهره‌گیری از معیار تخریب مناسب، فشار تخریب اولین لایه به دست آمد. تحلیل تنش مخزن تا جایی که همه‌ی لایه‌ها دچار تخریب شوند، ادامه یافت و در نهایت فشار متناظر با تخریب آخرین لایه به عنوان فشار ترکیدگی مخزن با استفاده مدلساز تخریب پیش‌رونده استخراج شد. مدل‌سازی از سه جزء تشکیل شده است: تحلیل تنش، ارزیابی تخریب و کاهش خواص مکانیکی. با تخریب هر لایه، خواص مکانیکی و استحکام آن بر اساس قوانین مشخصی، کاهش می‌یابد و در واقع لایه‌ای که دچار آسیب شده با لایه‌ای سالم ولی با خواص کاهش یافته، جایگزین می‌شود و سپس با ادامه‌ی این روند تا تخریب آخرین لایه، فشار ترکیدگی مخزن حاصل می‌شود. با توجه به اینکه مقادیر پیش‌فرض لحاظ شده برای پارامترهای طراحی مخازن با آنچه در حین تولید اتفاق می‌افتد - به علت عدم قطعیت‌های ذاتی و اجتناب‌ناپذیر تولید فاصله می‌گیرند، این امر باعث می‌شود تا نتایج حاصل از آزمون نمونه‌ی تولیدی با تخمین‌های اولیه فاصله‌ی جدی داشته باشد. بنابراین

شاخص قابلیت اطمینان به روش مرتبه‌ی اول، برنامه‌ای در نرم‌افزار متلب توسعه داده شده است. همان‌گونه که قبلاً شرح داده شد، ابتدا چندلایه‌ی کامپوزیتی در نرم‌افزار متلب تحلیل تنش شده و برای هر فشار معین، تنش‌های لایه‌های مختلف مخزن استخراج شد. در این بخش، این تنش‌ها به عنوان ورودی به برنامه‌ی متلب نوشته شده جهت تحلیل قابلیت اطمینان مخزن، داده می‌شوند. در نهایت با تحلیل صورت گرفته، شاخص قابلیت اطمینان β برای تک تک لایه‌ها استخراج می‌شود. همچنین احتمال تخریب هر لایه از روی شاخص قابلیت اطمینان به دست می‌آید. مسأله‌ی پیش رو، یک مخزن کامپوزیتی تحت فشار داخلی از جنس کربن/اپوکسی با لایه‌چینی [90/12/15/19/90/22/27/32/38/90] است.

نتایج تحلیل قابلیت اطمینان با استفاده از روش مرتبه‌ی اول قابلیت اطمینان در جدول 9 ارائه شده است. لازم به ذکر است که این نتایج برای فشار 35 مگاپاسکال به دست آمده است. در جدول 9 و ستون حالت خرابی، عدد درج شده زاویه الیاف و حرف M یا F معرف تخریب الیاف یا ماتریس است.

جدول 9 شاخص قابلیت اطمینان و احتمال تخریب

Table 8 Reliability index and probability of failure

شماره لایه	مد خرابی	شاخص قابلیت اطمینان (β)	احتمال خرابی (P_f)
2	12 M	0/4205	0/92103
3	15 M	0/7361	0/62304
4	19 M	0/7730	0/47572
5	22 M	0/7914	0/35201
6	27 M	0/8152	0/20487
7	32 M	0/8433	0/13498
8	38 M	0/8652	0/09674
1	90 M	1/1	0/05831
5	90 M	1/27	0/05104
10	90 M	1/35	0/04452
10	90 F	1/44	0/03616
5	90 F	1/55	0/03325
1	90 F	1/65	0/02937
8	38 F	2/05	0/02342
7	32 F	2/19	0/00183
6	27 F	2/37	0/00096
5	22 F	2/66	0/00035
4	19 F	2/95	0/0005
3	15 F	3/25	0/00034
2	12 F	3/35	0/0004

همان‌طور که در جدول 9 مشاهده می‌گردد، احتمال تخریب

σ تنش (MPa)
 β شاخص قابلیت اطمینان

7- مراجع

- [1] A. Saadat, E. Barati, Reliability estimation of cylinder strut of a training airplane by means of probabilistic design methodology, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 233-240, 2016.
- [2] Hwang, Tae-Kyung & Jae-Beom, Park & Hyung-Geun, Kim & Young-Dae, Doh & Soon-Il, Moon. (2006). Reliability Evaluation of a Composite Pressure Vessel. *Composites Research*. 19.
- [3] A. M. Okeil, S. Andrepont, Effect of Fiber-Reinforced Polymer Configuration on Reliability of Flexurally Strengthened Concrete Beams, *Transportation research record*, Vol. 2172, No. 1, pp. 201-209, 2010.
- [4] C. C. António, L. N. Hoffbauer, Uncertainty propagation in inverse reliability-based design of composite structures, *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, Vol. 6, No. 1, pp. 89-102, 2010.
- [5] P. F. Liu, J. Y. Zheng, Strength reliability analysis of aluminium-carbon fiber/epoxy composite laminates, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 23, No. 3, pp. 421-427, 2010.
- [6] N. Yang, P. K. Das و X. Yao, "Ultimate strength and reliability assessment of laminated composite plates under axial compression", *Ships and Offshore Structures*, Vol. 6, No. 1-2, pp. 105-113, 2011.
- [7] H. Dehmous, H. Weleman, Multi-scale reliability analysis of composite structures-Application to the Laroin footbridge, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 18, No. 3, pp. 988-998, 2011.
- [8] H. Weleman, H. Dehmous, Reliability analysis and micromechanics: A coupled approach for composite failure prediction, *International journal of mechanical sciences*, Vol. 53, No. 11, pp. 935-945, 2011.
- [9] Y. Xiang, Y. Liu, Inverse first-order reliability method for probabilistic fatigue life prediction of composite laminates under multiaxial loading, *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 24, No. 2, pp. 189-198, 2011.
- [10] H. M. Gomes, A. M. Awruch, P. A. Lopes, Reliability based optimization of laminated composite structures using genetic algorithms and Artificial Neural Networks, *Structural safety*, Vol. 33, No. 3, pp. 186-195, 2011.
- [11] R. H. Lopez, D. Lemosse, O. Eduard, An approach for the reliability based design optimization of laminated components, *Engineering Optimization*, Vol. 43, No. 10, pp. 1079-1094, 2011.
- [12] M. R. Motley, Y. L. Young, Influence of uncertainties on the response and reliability of self-adaptive composite rotors, *Composite Structures*, Vol. 94, No. 1, pp. 114-120, 2011.

امکان پیش‌بینی دقیق رفتار این سازه‌ها در بسیاری از کاربردها وجود ندارد و یا تحلیل و طراحی آن‌ها براساس رویکردهای قطعی و ضریب اطمینان منجر به طراحی سازه‌های مافوق بهینه می‌گردد. بنابراین مطالعه‌ی عدم قطعیت‌های هر یک از پارامترهای طراحی مخازن کامپوزیتی امری مهم می‌نماید. از این رو در بخش بعدی پژوهش با مدل‌سازی تصادفی، پیش‌بینی فشار تخریب با در نظر گرفتن عدم قطعیت در کسر حجمی و زاویه‌ی پیچش الیاف صورت گرفت. نتایج حاصل از این مدل‌سازی نشان داد که اگر پارامترهایی نظیر زاویه‌ی الیاف و کسرحجمی در بازه‌ای به صورت تصادفی تغییر کنند، چه میزان بر روی فشار تخریب تأثیرگذار خواهند بود.

در بخش بعدی این پژوهش، در ادامه‌ی ارزیابی ایمنی سازه، قابلیت اطمینان سازه با استفاده از روش مرتبه‌ی اول قابلیت اطمینان بررسی شد. با توجه به مکانیزم خرابی سازه، تابع عملکرد مناسب برای این تحلیل انتخاب شده و خواص مکانیکی و استحکام چندلایه به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شدند و به این ترتیب شاخص قابلیت اطمینان تک تک لایه‌های چندلایه‌ی مورد نظر استخراج شد. سپس از روی قابلیت اطمینان، احتمال شکست هر لایه نیز به دست آمد. به منظور صحت‌سنجی نتایج و اطمینان از نتایج به دست آمده، از شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شد که مقایسه‌ی نتایج آن با داده‌های حاصل از روش مرتبه‌ی اول قابلیت اطمینان، بیانگر دقت قابل قبول روش به کار گرفته شده است.

6- فهرست علائم

E_1	مدول یانگ در جهت طولی (GPa)
E_2	مدول یانگ در جهت عرضی (GPa)
E_{12}	مدول برشی (MPa)
X_T	استحکام کششی در جهت الیاف (MPa)
X_C	استحکام فشاری در جهت الیاف (MPa)
Y_T	استحکام کششی در جهت عمود بر الیاف (MPa)
Y_C	استحکام فشاری در جهت عمود بر الیاف (MPa)
S_{12}	استحکام برشی (MPa)
S_{23}	استحکام برشی عرضی (MPa)
E_f	مدول یانگ الیاف (GPa)
E_m	مدول یانگ ماده‌ی زمینه (GPa)
P_f	احتمال خرابی

علائم یونانی

ν ضریب پواسون

- ASME. *J. Pressure Vessel Technology*, Vol. 142, No. 2, pp. 031303, 2020.
- [22] L. Wang, C. Zheng, H. Luo, S. Wei, Z. Wei, Continuum damage modeling and progressive failure analysis of carbon fiber/epoxy composite pressure vessel, *Composite Structures*, Vol. 134, pp. 475-482, 2015.
- [23] C. T. Sun, Comparative Evaluation of Failure Analysis Methods For Composite Laminates, DOT/FAA/AR-109/95, 1996.
- [24] Z. Hashin, A. Rotem, A Fatigue Criterion For Fiber-Reinforced Materials, *Journal of Composite Materials*, Vol. 7, pp. 448-464, 1973.
- [25] R. Rafiee و A. Amini, Modeling and experimental evaluation of functional failure pressures in glass fiber reinforced polyester pipes, *Computational Materials Science*, Vol. 96, pp. 579-588, 2015.
- [26] G. Stefanou, The stochastic finite element method: past, present and future, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, Vol. 12-29, No. 198, pp. 1031-1051, 2009.
- [27] H. Karadeniz, Stochastic Analysis of Offshore Steel Structures, *Springer*, 2012.
- [28] M. F. Ren, X. Chang, H. Y. Xu, T. Li, Trans-scale analysis of composite overwrapped pressure vessel at cryogenic temperature, *Composite Structures*, Vol. 160, pp. 1339-1347, 2017.
- [29] R. Gison, Principles of Composite Material Mechanics, *CRC Press*, 2007.
- [30] B. Cai, Y. Liu, Z. Liu, X. Tian, R. Ji, Y. Zhang, Probabilistic analysis of composite pressure vessel for subsea blowout preventers, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 19, pp. 97-108, 2012.
- [31] A. Delbariani-Nejad, A. Farrokhhabadi, A failure criterion to predict the onset of matrix cracking induced delamination in general composite laminates, *Composite Structures*, Vol. 235, 111564, 2020.
- [13] B. Cai, Y. Liu, Z. Liu, Xi. Tian, R. Ji, H. Li, Reliability-based load and resistance factor design of composite pressure vessel under external hydrostatic pressure, *Composite Structures*, Vol. 93, No. 11, pp. 2844-2852, 2011.
- [14] B. Smith, B. Banerjee, Reliability of inserts in sandwich composite panels, *Composite Structures*, Vol. 94, No. 3, pp. 820-829, 2012.
- [15] X. U. Xue, G. X. Li, J. Z. Yang, J. Z. Gong, Reliability based buckling analysis of composite panels with tophat stiffened topology, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 217-219, pp. 91-95, 2012.
- [16] A. J. Sobey, J. I. R. Blake, R. A. Sheno, Monte Carlo reliability analysis of tophat stiffened composite plate structures under out of plane loading, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 110, pp. 41-49, 2013.
- [17] S. Sulaiman, S. Borazjani, S. H. Tang, Finite element analysis of filament-wound composite pressure vessel under internal pressure, *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, Vol. 50, 2013.
- [18] S. Patel, S. Ahmad, M. Singh, Reliability Analysis of Composites Under Low Velocity Impact, *Proceedings of the ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Vol. 3, pp. 19-24, 2016.
- [19] A. E. Burov, A. M. Lepikhin, V. V. Moskvichev, Strength and Reliability Analysis of Metal-Composite Overwrapped Pressure Vessel, *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1915, No. 1, pp. 04006, 2017.
- [20] R. Rafiee, M. A. Torabi, Stochastic prediction of burst pressure in composite pressure vessels, *Composite Structures*, Vol. 185, pp. 573-583, 2018.
- [21] A. Zolfaghari, M. Izadi, Burst Pressure Prediction of Cylindrical Vessels Using Artificial Neural Network,