نشریه مهندسی مکانیک
نشریه علمی انجمن مهندسان مکانیک ایران
ISME

ISSN: 1605-9719
DOI: 10.30506/MMEP.2022.545020.1983

مروری بر تست ارتعاش تصادفی مخازن تحت فشار کامپوزیتی با لاینر فلزی با کاربردهای فضایی

مجید مختاری*
مربی، گروه مکانیک خودرو، دانشکده شهید بابایی قزوین، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، قزوین

عباس الکائی بهجتی
محقق،
پژوهشگاه فضایی ایران، تهران

محسن عابدی
استادیار، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران

چکیده: با توجه به مخاطرات تست مخازن تحت فشار و با توجه به لزوم تست ارتعاش تصادفی مخازن فضایی در فاز کیفی، شناسایی و پیشنهاد روش‌های استاندارد و معتبر تست به عنوان مهم‌ترین هدف انجام این پژوهش بوده است. با توجه به تنوع مخازن، رویه تست روشنی برای تست مخازن تحت فشار وجود ندارد، از طرفی در استانداردهای معتبر بررسی شده مانند ISO، AIAA، MIL و ECSS رویه تست ارتعاشی مخازن به روشنی گزارش نشده است. با توجه به مخاطرات تست مخازن تحت فشار و اهمیت این مخازن، در این مقاله به بررسی رویه تست‌ها و مقالات معتبر در این زمینه پرداخته شده است تا با جمع‌بندی آن‌ها و لحاظ نکات ایمنی و دقت تست، بتوان رویه‌های تست مناسب برای این مخازن را پیشنهاد کرد. با جمع‌بندی روش‌های معتبر تست، رویه های تست ارتعاشی در قالب یک فلوچارت ارائه شده است. بر این اساس می‌توان تست ارتعاش تصادفی مخازن تحت فشار فضایی را با توجه به امکانات و محدویت‌ها و با کمترین هزینه و خطر احتمالی بر اساس مبنای معتبر جهانی اجرا و طرح ریزی کرد.

واژه های راهنما: مخازن تحت فشار، مخزن کامپوزیتی با لاینر فلزی، مخازن فضایی، طرح تست ارتعاش تصادفی

مقاله ترویجی
دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۵
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۳۰

Review of valid scenarios for random vibration testing of high-pressure composite vessels with metal liner for space application

Majid Mokhtari*
Instructor, Department of Automechanic, Faculty of Shahid Babaee, Qazvin Branch, Technical and Vocational University (TVU), Qazvin

Abbas Elkaie Behjati
Researcher, Iranian Space Research Center (ISRC), Tehran

Mohsen Abedi
Assistant Professor, Iranian Space Research Center (ISRC), Tehran

Abstract: Due to the risks of pressure vessels testing and need for random vibration test for qualification space tanks, identifying and proposing standard and valid testing procedure is the most important goal of this study. Due to various vessels tank types, detailed vibration test process is not reported in any aerospace standard, clearly, also study the famous standards like: ISO, AIAA, MIL and ECSS proof this fact. According to the vibration tests risks and importance of pressure vessels, in this article, the technical points of standards and valuable articles have been summarized to propose a proper vibration test procedures with safety and accuracy considerations. Reviewing the valid test methods leads to a vibration test procedure classification in the form of a flowchart. So, with this classification and with available equipment and test limitations considerations, random vibration test of space pressure vessels could be selected with the minimum coast and probable risks levels which are based on a valid universal process.

Keywords: Pressure Vessels, Composite Vessel with metallic liner, Space Vessels, Random Vibration

* نویسنده مسئول، m_mokhtari@tvu.ac.ir

مقدمه

با توجه به اهمیت استفاده از مخازن تحت فشار در مأموریت‌های فضایی و ملاحظات ایمنی آن‌ها، توسعه و تحویل نمونه‌هایی با قابلیت اطمینان بالا ضروری است. وجود استانداردهای مختلف در این حوزه و همچنین بررسی رویکرد کشورهای پیشرو می‌تواند اطلاعات قابل استنادی برای پیاده‌سازی در پروژه‌های جاری و آینده کشور، در اختیار گذارد. در کشور رویه تست استانداردی برای مخازن تحت فشار وجود ندارد، از طرفی در تمام استانداردهای معتبر بررسی شده مانند ISO، AIAA، MIL و ECSS؛ رویه تست ارتعاشی مخازن تحت فشار فضایی به هیچ عنوان مطرح نشده است. مخازن تحت فشار به عنوان یکی از راهکارهای اصلاح مداری و یا انتقال مداری در پروژه‌های کوچک و بزرگ نقش مهمی ایفا می‌کنند. در شاتل فضایی حدود ۴۵ مخزن تحت فشار استفاده شده است [۱]. بالا بودن فشار داخل مخازن و خطرات مهلک انفجار این مخازن در ماموریت، حین پرتاب یا در سایت می‌تواند آسیب‌های جبران ناپذیر مالی و انسانی دربر داشته باشد.

ناسا به عنوان یکی از معتبرترین مراکز فضایی دنیا، در این حوزه به تدوین دستورالعمل‌های مختلف برای طراحی، ساخت و تست انواع مخازن تحت فشار پرداخته است. AIAA نیز به عنوان یک مجموعه‌ی شناخته شده، استانداردهای اختصاصی برای توسعه و آزمون مخازن کامپوزیتی فضایی با لاینر[1] فلزی تدوین کرده است.

استاندارد AIAA-S-081 به عنوان تنها استانداردی است که به طور اختصاصی الزامات مربوط به طراحی و تست مخازن کامپوزیتی با لاینر فلزی را برای کاربری فضایی تشریح می‌کند. با این وجود در این استاندارد در خصوص الزامات تست‌های ارتعاشی مانند مراحل تست مخزن در فشار نهایی، تعداد نمونه معتبر برای انجام تست در سطح کیفی[2]، بازرسی مخازن قبل و بعد از تست و معیارهای رد و قبول تست‌ها توضیح دقیقی ارائه نشده است. عدم تشریح کامل تمام جوانب تست ارتعاشی در استانداردهای مربوطه عمدتا به علت وابستگی انتخاب پارامترهای ارزیابی به نوع مخزن، جنس لاینر، نوع سیال، دمای عملکردی مخزن، معیارهای طراحی و ساخت مخزن و مواردی از این دست است. از این رو دسته بندی نکات مطرح شده در مقالات و استانداردها بر اساس پارامترهای طراحی/ساخت، یک امر اجتناب ناپذیر برای دستیابی به رویکرد مناسب تست در کشور است.

در بین مخازن تحت فشار مختلف، نمونه‌های تقویت شده با الیاف و دارای لاینرهای فلزی به عنوان نمونه‌هایی هستند که قدرت تحمل فشار داخلی بیشتری دارند و در مقایسه با نمونه‌های تمام فلزی سبک‌تر هستند. استفاده از مخازن کامپوزیتی با لاینر فلزی[3] برای کاربری‌های فضایی، از دهه ۱۹۷۰ میلادی آغاز شده است. در برخی موارد کاهش وزن حدود ۱۱ ٪ و افزایش بیشینه بار تحمل شده در محدوده ۲۳ ٪ گزارش شده است [۲] که این مقدار برای یک پروژه‌ی فضایی با تعداد بالایی از مخازن تحت فشار (مثلاً برای شاتل فضایی حدود ۲۶ مخزن مختلف) مقدار قابل توجهی است. باید در خاطر داشت که مخازن اصلی پیشرانش از آن‌جایی که بخشی از بارهای خارجی حامل را در کنار فشارهای داخلی تحمل می‌کنند به عنوان سازه‌های تحت فشار شناخته می‌شوند.

مخازن کامپوزیتی با لاینر فلزی برای انجام تست‌های کیفی برخلاف مخازن تمام فلزی در مقیاس کوچک، تست نمی‌شوند و اولین تست‌های پذیرش آن‌ها همیشه با مقیاس کامل مخزن انجام می‌شود [۳]. از آنجایی که تحمل بار و آسیب وارده، به طراحی چیدمان الیاف وابسته است، فرایند ارزیابی تست‌های تأیید برای این مخازن می‌تواند مورد به مورد متفاوت باشد.

با توجه به مراجع [۴-۱۱] که شامل اسناد و مدارک انواع تست‌های مخازن فشار بالای شرکت ATK و همچنین دربردارنده دیتاشیت‌های تست‌های ارتعاشی مخازن فشار بالای این شرکت می‌باشند، تست‌های مخازن تحت فشار، در وضعیت پرشده از سوخت گازی اصلی و در فشار کاری انجام پذیرفته است. بیشینه فشار کاری مخازن ATK با مقدار 500 bar نیز گزارش شده است.

اما در رویکردی دیگر، بجای تست مخازن تحت فشار با سیال گاز اصلی (زنون)، از یک سیال مایع معادل استفاده شده است [۱۲]. این مخازن کامپوزیتی که دارای لاینر تیتانیومی هستند برای ذخیره گاز زنون در فضاپیمای ETS VIII طراحی شده‌اند. با وجود آنکه سیال اصلی گاز زنون است و فشار کاری طراحی 150 bar می‌باشد، جهت تست‌های ارتعاشی نمونه کیفی، از سیال عملکردی با نام PF 5060 در فاز مایع استفاده شده است (مشخصات سیال PF 5060 در مرجع [۱۳] ارائه شده است). همچنین جرم مورد انتظار برای گاز زنون 89 kg بوده است که در تست نمونه کیفی از همین مقدار PF 5060 استفاده شده

[1] Liner
[2] Qualification Level
[3] Composite Over Wrapped Pressure Vessel

است. علاوه بر آن پس از اجرای تست‌های ارتعاشی با مخزن شارژ شده، سیال تخلیه و همان تست‌ها مجدداً برای مخزن خالی نیز انجام شده است. در تست‌های پذیرش، مخزن تا "بیشترین فشار مورد انتظار کاری[1]" با نیتروژن گازی شارژ شده و در معرض تست‌های ارتعاش تصادفی در سطح پذیرش، قرار گرفته است.

در بررسی‌های انجام گرفته در مرجع [۱۲]، شبیه‌سازی‌های مربوط به رفتار تنشی و جابجایی دیواره مخزن انجام شده و مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. از جمله تحلیل‌های انجام شده برای ارزیابی مخازن می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد: ۱- تحلیل‌های المان محدود جهت انتخاب جنس لاینر، ۲- تحلیل‌های غیرخطی جهت طراحی سر یکپارچه و سر پورت‌دار مخزن استوانه‌ای، ۳- مدل‌سازی سه‌بعدی المان محدود برای تحلیل‌های مودال، ۴- تحلیل‌های ارتعاشات تصادفی جهت تعیین تنش و خستگی برآمده از ارتعاشات تصادفی بر روی مخزن و ۵- تحلیل‌های شوک جهت تعیین پاسخ تنش ناشی از شوک. نمونه‌ای از مخازن کامپوزیتی این تحقیق با لاینر فلزی تحت بار کیفی ارتعاشی در شکل ۱ نشان داده شده است.

یکی از اقدامات اصلی در اجرای تست‌های ارتعاشی مخازن فشار بالا، طراحی فیکسچر مناسب جهت قرارگیری مخزن بر روی میز تست می‌باشد. همان‌طور که در مراجع مختلف مشاهده شده است [۴-۱۲] برای هر تست و هر مخزن تقریباً یک فیکسچر مجزا طراحی و ساخته شده است. فیکسچر علاوه بر الزامات جانمایی مخزن در استند تست، می‌بایست دربردارنده الزامات ایمنی نیز باشد. بنابراین با طراحی فیکسچر مناسب در نهایت می‌توان از ریسک‌های تست مخازن فشار بالا به شدت کاست. از طرف دیگر بالا بودن امپدانس[2] فیکسچر و مقدار فرکانس طبیعی آن نیز در بررسی نتایج دینامیکی و در نظر گرفتن محدود کننده‌ی نیرویی موثر است.

شکل ۱ شماتیکی از تست ارتعاش تصادفی مخازن تحت فشار کامپوزیتی با لاینر فلزی با گاز زنون [۱۲]

در آزمایشگاه‌های معتبر دنیا تست‌های مربوط به ارتعاشات سیستم‌های مختلف در سه مجموعه‌ی متفاوت انجام می‌شود که نیازمندی‌های هر بخش و کلاس‌های تستی به عنوان مبنای دسته‌بندی این مراکز تستی هستند. از این رو استفاده از یک زیرساخت تست برای تست تمام المان‌ها و سیستم‌ها یک رویکرد مناسب و منطقی نیست. به عنوان مثال در ناسا از سه دسته آزمایشگاه زیر استفاده می‌شود [۱۴]:

- آزمایشگاه ارتعاشات عمومی
- آزمایشگاه ارتعاشات فضاپیما
- تست استند آزمون‌های خطرناک

طبق دسته‌بندی انجام شده برای هر آزمایشگاه، تجهیزات مشخصی در نظر گرفته شده است که در جدول ۱ نشان داده شده است.

بررسی عیوب سازه‌ای با استفاده از ابزارهای بازرسی غیر مخرب انجام می‌شود و قبل از انجام تست‌های مخرب باید پیاده سازی شود. تست‌های مخازن تحت فشار و مواد سوختی خصوصاً آزمون‌های ارتعاش در شرایط دمایی، به عنوان تست‌های خطرناک دسته‌بندی می‌شوند. انجام این دست تست‌ها در شرایط

[1] Maximum Expected Operating Pressure (MEOP)

[2] Impedance

محیطی و دمایی عملیاتی، اجتناب‌ناپذیر است. یکسری از تست‌های ارتعاشی اشاره شده در سرویس‌های قابل ارائه در مجموعه آزمایشگاه‌های ناسا در مرکز فضایی جانسون برای تخمین آسیب‌های تهدید کننده‌ای است که ناشی از آسیب‌های انسانی است و به عنوان شرایط محیطی مأموریت، محسوب نمی‌شوند. همچنین اصلاح مدل‌های المان محدود ساخته شده نیز به عنوان خدمات این آزمایشگاه‌ها عنوان شده است. این بدان معناست که استفاده از آزمایشگاه‌های تست ارتعاشی تنها برای انجام تست‌های پذیرش، کیفی یا پروازی برای قطعات و سیستم‌های فضایی نیست، بلکه مصارف دیگری نیز دارد که از آن جمله می‌توان به به‌روز کردن مدل المان محدود و واقعی سازی آن و همچنین ارزیابی ایمنی قطعات در مخاطرات انسانی مانند ضربه و افتادن از ارتفاع اشاره کرد.

جدول ۱ آزمایشگاه‌های ارتعاشی ناسا و مشخصات تجهیزات موجود در آن [۱۴]

تجهیز	محدوده فرکانسی (Hz)	محدوده ابعادی میز ارتعاش[1] (lb)	راستای بارگذاری	جابجایی
آزمایشگاه ارتعاش عمومی (GVL[2])	۵ - ۳۰۰۰	۴۰۰۰-۴۰۰۰۰	x, y, z	۱ تا ۲ اینچ پیک تا پیک
آزمایشگاه ارتعاش فضاپیما (SVL[3])	۵ - ۲۰۰۰	بالای ۸۰۰۰۰	x, y, z	۲ اینچ پیک تا پیک
استند تست خطرناک	۲۰۰۰ - ۲۰	۱۱۰۰۰ RMS[4] بالای ۱۶۰۰۰ برای سینوسی بالای ۱۵۵۰۰ برای بار تصادفی	x, y, z	۱ اینچ حرکت

در مجموعه‌های آزمایشگاهی ناسا و بر اساس دسته‌بندی انجام شده در جدول ۱، تست قطعات عمومی بزرگ و کوچک در آزمایشگاه عمومی و تست سازه‌های بزرگی مانند شاتل، ماهواره‌بر Apollo و مانند آن در آزمایشگاه ارتعاشات فضاپیماها انجام می‌شود. برای تست سازه‌های بزرگ از فنرهای پنوماتیکی و ترکیبی از دو میز ارتعاش استفاده می‌شود [۱۴].

ضربه به عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات تهدید کننده برای مخازن کامپوزیتی است. ارزیابی مخازن کامپوزیتی تحت فشار در برخورد با زباله‌های فضایی [۱۵] به عنوان موضوعی است که در راستای بررسی استحکام مخازن کامپوزیتی و اثر ضربه، به صورت تجربی انجام شده و با استخراج یک معادله برای تخمین سلامت مخزن تحت ضربه جمع‌بندی شده است.

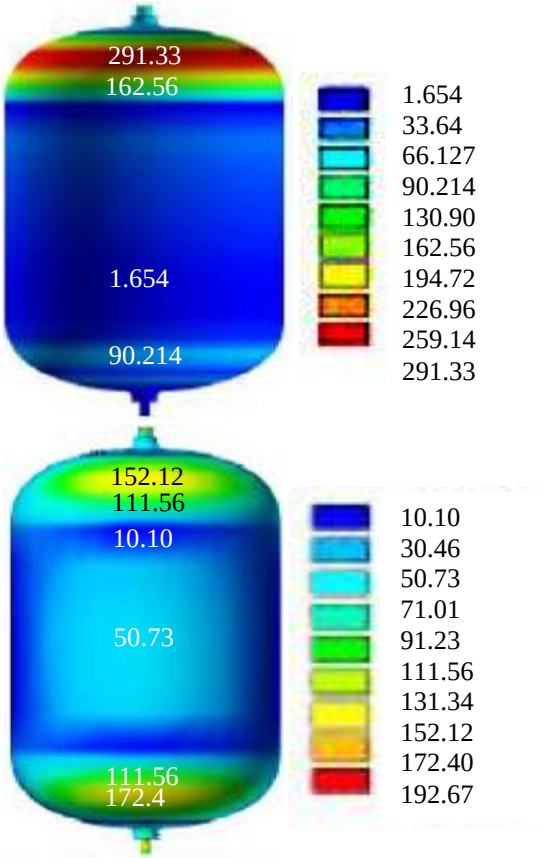
ارائه تحلیل‌های بهینه شده برای طراحی مخزن‌های کامپوزیتی تحت فشار در مرجع [۱۶] در قالب تئوری جدیدی موسوم به "روش طراحی ساختار با رابطه متناظر[5]" ارائه شده است. همچنین چن و همکارش در این مقاله نتایج تئوری جدید خود را در کنار نتایج تحلیلی نرم افزار ANSYS بررسی کرده‌اند.

بررسی المان محدودی مخازن کامپوزیتی عمدتا برای دید مهندسی، کم کردن گزینه‌های تست و تخمین شرایط، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تحلیل دینامیکی صورت گرفته توسط تام و همکارانش که با نرم افزار ANSYS انجام گرفته است، نتایج آنالیز مودال و توزیع تنش ناشی از بارگذاری ارتعاشی و شوک در مخازن تحت فشار کامپوزیتی گزارش شده است. حجم مخزن مورد تحلیل ۸۱/۴ لیتر و بیشترین فشار کاری آن ۳۱۰ بار اعلام شده است. سطح شتاب ارتعاش تصادفی ۱۸/۱ برابر شتاب گرانش زمین و شوک اعمالی ۷۰۰۰ برابر شتاب گرانش زمین برای تحلیل در نظر گرفته شده است. نتایج تحلیل و کانتورهای تنش ناشی ار ارتعاشات تصادفی در شکل ۲ نشان داده شده است [۱۷].

استانداردهای فضایی برای فازهای پروژه‌های فضایی چند سطح تعریف می‌کنند که دومین سطح آن، سطح تست‌های پذیرش است. بیان استراتژی تست برای مخازن نوع ۳ مورد استفاده در شرکت ایرباس در مرجع [۱۸] تشریح شده است و به جزییات تست مخازن تحت فشار اشاره نشده است.

با توجه به اهمیت استفاده از مخازن تحت فشار در دستیابی به اهداف مهم فضایی و با توجه به بالا بودن ریسک به کارگیری از این مخازن در ماموریت‌های فضایی (خسارات مالی و جانی روی زمین و انجام نشدن کل ماموریت در فضا) انجام تست ارتعاش تصادفی الزامی است، با راهکارهایی که در این مقاله بدان اشاره شده است، مخاطرات و خسارات احتمالی به حداقل ممکن خواهد رسید. لذا نتایج این مقاله عینا قابل استفاده برای تیم‌های طراح و بهره بردار است.

1 Shaker
2 General Vibration Lab
3 Spacecraft Vibration Lab
4 Root Mean Square
5 Correspondence Relationship Structure Design Method



شکل ۲ کانتور تنش ارتعاشات تصادفی؛ بالا: راستای طولی- پایین: راستای عرضی (بیشترین مقدار تنش در ارتعاشات رندوم ۲۹۱ مگاپاسکال در راستای طولی) [۱۷]

شکل ۳ نمایی از بلوک انتقال مداری و مخازن تحت فشار ساخته شده در پژوهشگاه فضایی ایران

با توجه به اهمیت تست مخازن کامپوزیتی تحت فشار ساخته شده در داخل کشور (شکل ۳)، و با توجه به مخاطرات پیش رو، در این مقاله به بررسی پارامترهای مؤثر در تست ارتعاشات تصادفی مخازن تحت فشار کامپوزیتی با لاینر فلزی پرداخته شده و نکات مطرح در استاندارد AIAA-S-081 و دیگر مراجع معتبر، بررسی و جمع‌بندی شده است. همچنین، ملاحظات مختلف گزارش شده در آزمون ارتعاش مخازن تحت فشار شامل توسعه فیکسچر و استفاده از روش‌های جایگزین برای اجرای آزمون دسته بندی شده و در پایان با طرح آسیب‌های احتمالی برای مخازن تحت فشار کامپوزیتی با لاینر فلزی مسیرهای مختلف برای تست این نوع مخازن پیشنهاد شده است که می‌تواند در کاهش هزینه‌ها و مخاطرات حین تست، مؤثر باشد. متنوع بودن انواع مخازن تحت فشار، موثر بودن شرایط ساخت، سهم تاثیر گذاری شبیه سازی‌های عددی (بدان معنی که برای طراحی تست، سطوح ارتعاشی، طول ترک مجاز و مانند آن چقدر از نتایج عددی معتبر استفاده شده است)، تعداد تست‌های کوپن استاندارد و متفاوت بودن زیرساخت‌های انجام آزمون منجر شده است که یک رویکرد واحد و استاندارد برای تست ارتعاش تصادفی مخازن وجود نداشته باشد، از این رو دسته‌بندی فعالیت‌های موجود و مخاطرات و زمینه‌های پوشش آن‌ها به انتخاب یک روند تست مناسب کمک شایانی خواهد کرد.

۲- طراحی و ارزیابی مخازن فضایی تحت فشار کامپوزیتی با لاینر فلزی

مخازن تحت فشار در صنایع فضایی پرکاربرد هستند. بر اساس استاندارد نظامی MIL-340 [۳] زمانی طراحی یک مخزن تحت فشار مورد تأیید است که شرایط عمومی طراحی (شکل ۴) که برای دو رویکرد طراحی مورد تأیید (A و B)، طرح‌ریزی شده است، اجابت شود. رویکرد اول استفاده از کدهای مورد تأیید و ضرایب طراحی پیشنهاد شده توسط استاندارد ASME است (که با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۴ موجب افزایش وزن مخزن خواهد بود و برای مخازن فضایی توصیه نشده است) و روش دوم تحلیل تنش مخزن در فشار بیشترین فشار مورد انتظار کاری و استخراج مود آسیب است. در رویکرد دوم از روی مود آسیب، فرایند تحلیل، شناسایی و انتخاب می‌شود. مودهای آسیب برای مخازن تحت فشار عبارتند از: ۱) نشتی قبل از انفجار و نشتی موادی که خطرناک محسوب نمی‌شوند و ۲) مود خرابی شکست ترد یا نشت قبل از انفجار برای گازهای خطرناک. برای اقدام از طریق رویکرد دوم، تایید عمر-مطمئن و تست‌های پذیرش باید پیاده سازی شود. تایید عمر- مطمئن با انجام تحلیل‌های مکانیک شکست برای مخزن و یا انجام تست‌های عمر-مطمئن قابل انجام است. تست‌های پذیرش شامل بازرسی‌های غیر مخرب و اثبات از طریق تست در سطح پذیرش است.

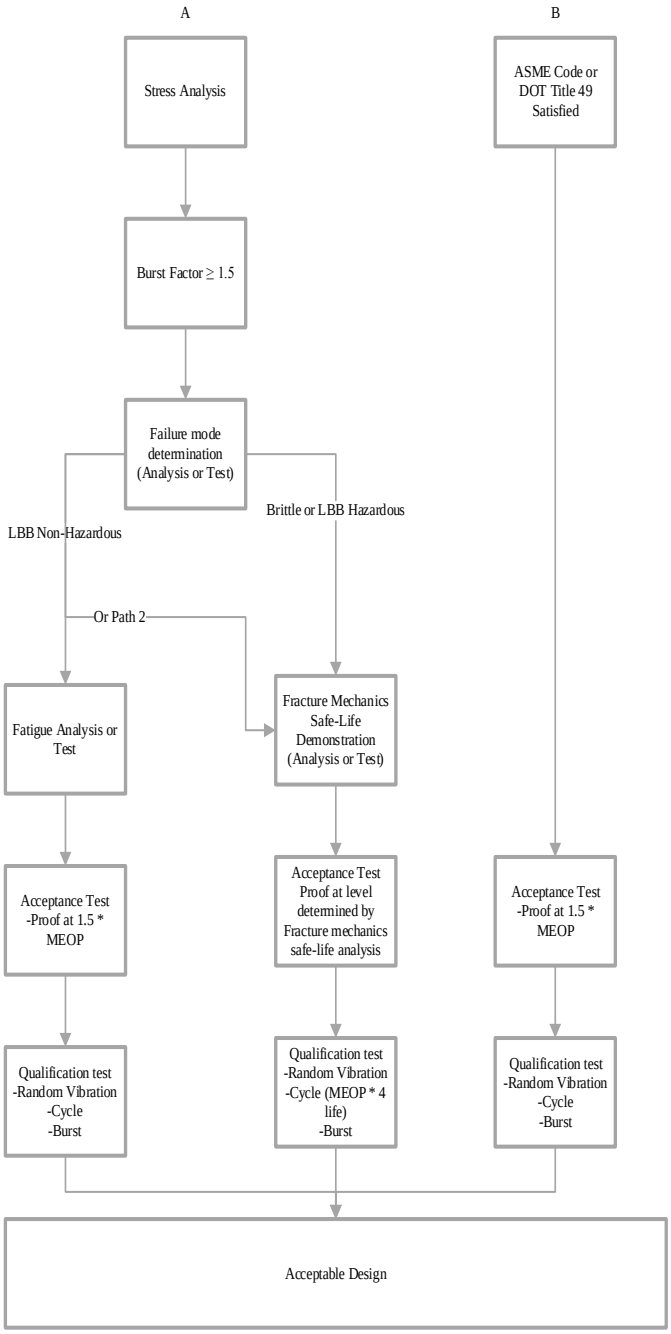
در فرآیند تست، تعیین سطح فشار مجاز از روی شبیه سازی‌های عددی و تست‌های مکانیک شکست و براساس بیشینه ابعاد عیوبی که در مخزن شناسایی شده است (و مجاز بوده است)

باید تعیین شود؛ هرچند که طبق استاندارد [۳] کم‌ترین مقدار این فشار، ۱/۲۵ برابر بیشترین فشار مورد انتظار کاری باید باشد. برای مخازن جدار نازک یا مخازنی که از مواد با چقرمگی شکست بالا تولید شده‌اند باید ابعاد عیوب از طریق تست‌های غیر مخرب ارزیابی و در تحلیل مکانیک شکست استفاده شود. خروجی تحلیل، برای تست تأیید استفاده خواهد شد. از طرف دیگر برای انجام یک تست مطمئن، کیفیت‌سنجی مخزن بر اساس تست‌های غیر مخرب و بر مبنای تلورانس مجاز عیوب باید انجام شود تا از آسیب مالی و جانی تا جای ممکن جلوگیری شود [۳]. تلورانس‌های مجاز بر اساس تست‌های سازه‌های پیش- ترک‌دار یا شبیه سازی‌های عددی و تحلیل مکانیک شکست سازه انتخاب و گزارش می‌شود. فشار انفجار طراحی، عبارت است از حاصلضرب بیشترین فشار مورد انتظار کاری در ضریب انفجار[1] نکته‌ی مهم در طراحی مخازن تحت فشار کامپوزیتی با لاینر فلزی این است که این مخازن باید به نحوی طراحی شوند که بخش کامپوزیتی آن‌ها در صورت نشت محتویات داخل، اجازه نشت را از لاینر به بیرون بدهد تا از خرابی و پارگی الیاف کامپوزیتی جلوگیری شود. آسیب‌ها و چالش‌های زیر به عنوان پارامترهای بحرانی در فرایند طراحی هستند که می‌توانند موجب افت خواص، کاهش راندمان، ایجاد پتانسیل آسیب و کاهش عمر سازه شود. از این رو طراح باید در فرایند طراحی و ارزیابی تست این موارد را مورد توجه قرار دهد:

۱- طراحی نامناسب (ضخامت لاینر، جنس لاینر، فرایندهای اتصال اجزا به هم)
۲- رشد ترک در لاینر فلزی (ارزیابی بر مبنای مکانیک شکست و تحلیل خستگی)
۳- پارگی تنشی
۴- آسیب مکانیکی (مانند ضربه حین حمل)
۵- خوردگی
۶- تردشدگی (ناشی از شرایط محیطی خارج جو و دمایی)

بررسی استانداردهای فضایی و مراجع معتبر در حوزه مخازن تحت فشار

بر اساس استانداردهای معتبر مشخصات تمامی مواد و تجهیزات با جزئیات مربوطه باید ذکر شوند. روش انجام کار، اعم از روش تهیه نمونه، روش انجام آزمون‌ها و همچنین ترتیب و شرایط انجام کار نیز باید با جزئیات کافی تشریح شوند. این نکاتی هستند که در مستندسازی داده‌های تست باید همیشه مورد توجه باشند.



شکل ۴ رویکردهای تأیید طراحی مخازن تحت فشار بر اساس استاندارد MIL [۳]

استانداردهایی که برای مخازن تحت فشار مطرح هستند، از حیث مباحث تحت پوشش از تنوع بالایی برخوردارند. چهار استاندارد استفاده شده برای مخازن تحت فشار برای کاربری‌های فضایی عبارت‌اند از MIL-1522A، BS ISO 14623، ECSS-E-ST-32-02 و AIAA-S081A. استاندارد نظامی MIL برای

[1] Burst Factor

مخازن تحت فشار فلزی تدوین شده است، موضوع مخازن تحت فشار کامپوزیتی با لاینر فلزی فضایی در استاندارد AIAA-S081A به طور اختصاصی بحث شده است و در استانداردهای ECSS و BS ISO 14623 مخازن کامپوزیتی به عنوان بخشی از موضوع بحث، به صورت محدود تشریح شده است.

در استاندارد ECSS با توجه به دو مورد زیر، بر اجرای آزمون تحت فشار در شرایط بارگذاری برای دو مخزن با جرم یکسان، برای انتخاب نوع سیال و فشار آن تأکید شده است:

• تست ارتعاش باید در شرایط فشاری که بیشترین ارتعاشات در آن پیش‌بینی می‌شود انجام شود [۱۹].

• تجهیزات داخلی محصول که در طول پرتاب کار می‌کنند، باید در طول تست نیز مطابق با شرایط نامی عملکرد، فعال بوده و رصد شوند [۱۹].

بر اساس استاندارد AIAA الزام است که تمام مخازن کامپوزیتی با لاینر فلزی برای بار تصادفی ارتعاشی تست شوند [۱۹]. با توجه به ریسک بالای کار و استفاده از مخازن بزرگ برای ماموریت‌های فضایی جدید، از آنجایی که میزهای ارتعاشی نادری هستند که تست ارتعاش تصادفی مخازن تحت فشار کامپوزیتی با لاینر فلزی مقیاس کامل را انجام دهند (هم از نظر فنی و هم قبول ریسک انفجار)، از روش جایگزینی استفاده می‌شود که در آن روش، بارگذاری فشار استاتیک در سیکل‌های متناوب که شرایط معادل آسیب خستگی را به وجود می‌آورد جایگزین تست ارتعاش تصادفی می‌شود [۲۰]. برای این موضوع یک تحلیل سه‌بعدی از مخزن انجام می‌شود تا مودهای فرکانسی متقارن و نامتقارن بررسی شود و مخزن تحت فشار کامپوزیتی با لاینر فلزی با و بدون لحاظ فشار تحلیل شود. استخراج بار استاتیک معادل باید با استفاده از تحلیل‌های بار کوپل شده در ارتعاشات تصادفی سطح کیفی انجام شود. تنش و کرنش محاسبه شده در تحلیل برای مقایسه با نتایج تجربی استفاده خواهد شد. برای سیستم‌های تک مخزنی، از یک مدل متقارن محوری برای آنالیز مودال و تحلیل تنش استفاده می‌شود. این مدل متقارن محوری برای استخراج تمام مودهای مخزن و بارگذاری‌های نامتقارن قابل استفاده نیست. از طرف دیگر شیفت فرکانسی ناشی از مخزن تحت فشار باید در تحلیل‌ها مد نظر قرار گیرد چون یک تحلیل نامناسب می‌تواند شرایطی را به وجود آورد که با تست واقعی فاصله دارد. همچنین تأکید شده است که زمانی باید از بارهای استاتیکی معادل استفاده کرد که دسترسی به تجهیز ارتعاش تصادفی وجود نداشته باشد [۲۰].

با بررسی استاندارد اختصاصی مخازن تحت فشار کامپوزیتی با لاینرهای فلزی [۲۱] تست‌هایی که باید بر روی مخزن انجام شود بیشتر روشن می‌شود. در تمام استانداردها به موضوع عمر-مطمئن اشاره شده است. طبق استاندارد AIAA S-081A عمر مطمئن به معنای عمر تحمل آسیب است. برای ارزیابی عمر مطمئن فرایند ذیل پیشنهاد شده است: برای ارزیابی عمر-مطمئن، لاینر فلزی مخازن تحت فشار کامپوزیتی که دارای بزرگ‌ترین آسیب غیر قابل شناسایی طی NDT است را در نظر می‌گیرند، با استفاده از تحلیل یا تست بیشترین زمان پر و خالی شدن یا بیشترین تعداد سیکل فشاری قابل تحمل توسط این مخزن که نشتی یا آسیب ناگهانی فاجعه‌آمیزی در بار سرویس مدنظر و شرایط محیطی رخ نداده را محاسبه/ اندازه‌گیری می‌کنند و به عنوان عمر مطمئن اعلام می‌کنند.

پوسته کامپوزیتی باید عمر خستگی مناسب و مکفی داشته باشد تا دچار از هم گسیختگی الیاف نشود. کمینه عمر خستگی باید چهار برابر عمر سرویس باشد. در صورت الزام مرجع دارای صلاحیت، تعداد سیکل‌های برنامه ریزی شده برای مخازن تحت فشار کامپوزیتی باید شامل فشار سایت-پرتاب در ۱/۱ برابر بیشترین فشار کاری در زمین باشد [۲۱].

تمام نواحی مخزن به‌جز نواحی برشی سازه اصلی[1] (ناحیه‌هایی از باس مخزن که بیشترین تنش‌های برشی را تحمل می‌کنند) باید دارای عمر مطمئنی معادل ۴ برابر عمر سرویس داشته باشند. بر اساس این استاندارد، طول ترک اولیه باید بر اساس توانمندی روش ارزیابی سلامت قطعه، الزام شده در برنامه بازرسی مخزن تعیین شود. بازرسی لاینر پیش از اعمال کامپوزیت بر سطح آن باید انجام شود. روش بازرسی باید به نحوی باشد که ابعاد، شکل، راستا و موقعیت عیوب را شناسایی کند. روش انتخاب شده برای بازرسی عیوب باید بتواند به احتمال ۹۰ ٪ و اطمینان ۹۵٪ عیوب سازه‌ای را شناسایی کند. پس از لایه نشانی کامپوزیتی بازرسی سطح کامپوزیت باید به صورت بصری و توسط یک فرد آموزش دیده و مطابق طرح کنترل آسیب تعریف شده، انجام شود [۲۱].

الزامات نشتی قبل از انفجار[2] تنها به لاینر اعمال می‌شود و برای رویه کامپوزیتی لحاظ نمی‌شود. به تعبیر دیگر، مود خرابی نشت پیش از انفجار به عنوان مود آسیبی است که برای طراحی لاینر مد نظر قرار می‌گیرد. این معیار برای تمام نواحی پوشیده شده با کامپوزیت معتبر است و برای دیگر نواحی که با کامپوزیت پوشانده نشده‌اند باید معیار عمر مطمئن و با در نظر گرفتن وجود

[1] Bus

[2] Leak Before Burst

یک آسیب اولیه، بررسی شود. نکته‌ی مهم این است که نواحی برشی مخزن که تحت تنش برشی بالایی در اثر فشار داخلی هستند از ارزیابی نشتی قبل از انفجار مستثنی هستند [۲۱].

پارگی تنشی به عنوان یکی از خرابی‌هایی است که متناسب با عمر مخزن و میزان اطمینانی که بهره‌بردار مد نظر دارد تعریف می‌شود؛ بدین‌صورت که برای مخزن تحت فشاری که در سایت پرتاب پر شده‌اند، احتمال سالم ماندن آن باید برای یک سال عدد ۰/۹۹۹ و بهتر از آن باشد [۲۱].

از آن‌جایی که مخازن آسیب دیده، کم‌ترین فشار انفجار را تحمل می‌کنند از این‌رو در نظر داشتن برنامه‌ای برای ایمنی سازه از آسیب‌های مکانیکی از اهمیت بالایی برخوردار است. یک یا چند رویکرد از رویکردهای زیر برای اجابت تمهیدات ایمنی باید انجام شود: [۲۱]

۱- پوشش‌های محافظ: این پوشش‌ها برای اطمینان از عدم آسیب ناشی از برخورد با انرژی۵ ft-lb یا انرژی کمتر به مخازن تحت فشار کامپوزیتی است که پیش‌تر باید تست و تأیید شده باشد. در صورتی که سطح انرژی برخورد بیشتر از مقدار مطرح باشد مخزن مدنظر باید تست فشار شود تا الزام ضریب انفجار، مجدد تأیید شود.

۲- نشانگر آسیب: می‌توان از یکسری نشانگر استفاده کرد تا سطح مجاز آسیب، شناسایی شود.

۳- تست دوام برای تهدید بدبینانه: در این تست با ضریب ۱/۲۵، مخزن تحت ضربه بدبینانه (در بدترین وضعیت ممکن و بیشترین وزن محتمل برای اصابت) قرار می‌گیرد و پس از آن الزام مربوط به ضریب انفجار، مجدد بررسی می‌شود.

۴- بازرسی چشمی

مقدار مجاز سطح-A به صورت کرنش یا تنشی که ۹۹ ٪جمعیت مورد آزمون تجربه می‌کنند یا به بیشتر از مقدار مجاز تعیین شده با سطح اعتماد ۹۵ ٪ می‌رسند، تعریف می‌شود. استخراج مقادیر مجاز سطح-A برای مخزن کامپوزیتی بر اساس نتایج به دست آمده از تست فشار انفجار برای مخزن مقیاس شده و یا مقیاس کامل به دست می‌آید. اگر مقادیر مجاز مطرح بر اساس مخازن مقیاس شده یا مخازن مقیاس کامل با شکل هندسی دیگر اندازه‌گیری شده باشد، باید به صورت تحلیلی مورد تأیید بودن مقادیر مجاز برای نمونه اصلی، نشان داده شود. این در حالی است که برای استخراج مقادیر مجاز مخازن تست شده باید از نظر روش ساخت و مواد، مشابه نمونه اصلی باشند [۲۱]. این در حالی است که استفاده از مخازن مقیاس کامل برای تست‌های توسعه‌ای الزامی است [۳].

تغییر در سیستم رزین نیازمند تست مجدد سه نمونه‌ی مقیاس شده و یا مقیاس کامل است. استحکام متوسط برای تعداد نمونه‌های تحویل داده شده به مشتری که از رزین جدیدی استفاده شده است باید با مقادیر قبلی مقایسه شود. برای جمعیت آزمون اگر میانگین و واریانس تست‌ها یکسان باشد، نمونه‌ها معادل هم هستند (تست‌های معادل که در MIL-HDBK-17 تشریح شده است) و نیاز به تست مجدد نیست [۲۱]. بر اساس این استاندارد، فرایند ساخت و کنترل قطعات کامپوزیتی باید بر اساس MIL-HDBK-17 انجام شود که اختصاصاً برای ساختارهای کامپوزیتی، توسعه داده شده است.

طبق استاندارد AIAA برای تست تأیید سطح پذیرش ، هر مخزن تحت فشار کامپوزیتی بالاینر فلزی باید تست تأیید فشار شود تا از میزان یکپارچگی مناسب و دوام آن در برابر بارهای سرویس، فشار، دما و شرایط محیطی اطمینان حاصل شود. تست تأیید فشار برای کمینه مقدار فشار از بین روابط ۱ و ۲ باید انجام شود [۲۱]:

$$P = (1+ \text{Burst factor})/2 \times MEOP \text{ (for the burst factor less than 2)} \quad (۱)$$

$$P = 1.5 \times MEOP \text{ (for a burst factor equal to or greater than 2)} \quad (۲)$$

شماتیکی از شیرهای تخلیه و محدودیت‌های فشاری باید مشخص شود و قبل از انجام تست‌ها یا فرایندهای خطرناک که در آن مخازن تحت فشار درگیر هستند، باید از پیش تست‌های ارزیابی روی مخازن بدون فشار استفاده کرد تا فرایندهای کاری تست اصلی کاملاً مشخص شود. تست‌های اولیه باید در فشاری کمتر از ۵۰ ٪ فشار بیشترین فشار مورد انتظار کاری یا فشارهای نرمال عملیاتی مخزن، انجام شود تا مشخصات عملیاتی تست به درستی تعریف و پایدار شود [۲۱].

فرایندی که برای پیش پرتاب مخزن در نظر گرفته می‌شود مطابق استاندارد بدین‌صورت است که ابتدا بازرسی مخزن انجام می‌شود و در صورت مشاهده شدن آسیب جدی بحرانی، مخزن امحا خواهد شد و در غیر این صورت مخزن را با فشاری برابر با ۱/۱ فشار بیشینه عملکردی روی زمین و به مدت ماند ۱۰ دقیقه تست می‌کنند. عملیات پرفشارسازی مخزن یا باید از راه دور هدایت شود یا باید در مخازن محافظ انفجار صورت پذیرد [۲۱].

شبیه‌سازی‌های انجام شده برای مدل‌های بدون آسیب مخزن برای اندازه‌گیری تنش، کرنش و جابجایی‌ها است. تحلیل باید شامل تنش‌های ناشی از اثرات ترکیبی فشار داخلی، بارهای زمینی یا پروازی، دما و گرادیان دما باشد. تحلیل تنش باید با در نظر گرفتن تنش‌های پسماند، تنش‌های ناشی از موانع فیزیکی

(حین نوسان یا فشرده‌سازی گاز/ سیال)، تلورانس‌های ساخت، شرایط تست و تنش‌های ناشی از تجمیع باشد. شبیه‌سازی مخزن باید شامل ۱- تحلیل تنش، ۲- تحلیل خستگی، ۳- تحلیل عمر مطمئن (تحلیل تحمل آسیب) و ۴- نشتی قبل از انفجار باشد. تحلیل تنش در حین تست‌های توسعه‌ای و کیفی باید با نتایج تست تأیید شود. از آنجایی که بارگذاری روی مخزن از بارهای سیکلیک با دامنه‌ی متغیر ناشی می‌شود استفاده از قانون ماینر به عنوان تکنیک آسیب تجمعی خستگی قابل استفاده و مورد تأیید است. محدودیت مورد تأیید برای آسیب خستگی تجمعی برای نوسانات با دامنه‌های متغیر باید ۸۰ درصد محدودیت نرمال (با دامنه ثابت) باشد [۲۱].

تحلیل نشت قبل از انفجار به عنوان یک تحلیل شکست الاستیک خطی است که شامل اجابت شرایط زیر است:

• در هر بارگذاری ترک جزئی داخل ضخامت یا آسیب سطحی مخزن با نرخ شکلی a/2c (a و c پارامترهای ترک هستند) بین ۰/۱ تا ۰/۵ ، نباید منجر به خرابی (مانند انفجار ناگهانی) شود.

• بررسی رشد ترک جزئی داخل ضخامت و تبدیل شدن آن به ترک عبوری و رسیدن طول آن به ۱۰ برابر ضخامت لاینر که موجب بروز نشت قبل از انفجار خواهد شد باید انجام شود. پس از طی چهار دوره زمانی عمر، ظرفیت تحمل آسیب به صورت طول مجاز ترک سطحی‌ای که به‌طور پیوسته رشد کرده تا شرایط اخیر را اجابت کند، تعریف می‌شود.

برای ارزیابی مخزن کامپوزیتی با لاینر فلزی از دیدگاه مکانیک شکست استاندارد اختصاصی ایستگاه فضایی [۲۲] به بیان مواردی در خصوص الزامات ترک در مخازن تحت فشار پرداخته است که از آن جمله می‌توان به بروز نشت در طول ترکی بیشتر از ۱۰ برابر ضخامت مخزن اشاره کرد.

تحلیل و تست عمر خستگی برای سازه‌ی بدون عیب انجام می‌پذیرد و تست و تحلیل عمر مطمئن و نشتی قبل از انفجار بر مبنای مکانیک شکست و با فرض عیوب موجود در سازه انجام می‌شود [۲۱].

در ارزیابی تجربی عمر مطمئن باید شرایط دمای محیط نیز برای اعمال بار دیده شود. برای ارزیابی تست‌های رشد ترک در بارهای مستمر ، از ۴ دوره عمر یا ۱۰۰۰ ساعت تست استفاده می‌شود (هرکدام کمتر بود). طراحی مخزن باید به نحوی باشد که بیشترین کرنشی که تحمل می‌کند کمتر از مقدار بار آستانه‌ی رشد ترک در نمونه‌ی تحت فشار دارای ترک باشد.

کمترین زمان برای تست‌های تأیید ۵ دقیقه است و شرایط تست تأیید در فشار بیشینه مورد انتظار و با فیکسچرهایی که نماینده شرایط واقعی هستند انجام می‌شود. شرایط دمایی تست باید به نحوی باشد که بدترین شرایط برای ارزیابی مهیا شود. نکته بسیار مهم این است که باید توجه ویژه‌ای به پارگی تنشی الیاف حین تست "تأیید" شود. مخزن در این تست نباید دچار پارگی الیاف و لاینر، تغییر شکل دائمی و نشتی از بدنه شده باشد. معیار رد یا پذیرش باید از پیش فرموله شود و اگر چنین معیاری نباشد باید تست‌های توسعه‌ای انجام شود تا معیارها استخراج شود [۲۱].

برای مخازن تازه طراحی شده یا با طراحی تغییر یافته، علاوه بر تست‌های تصدیق الزامات باید تست‌های کیفی به ترتیب زیر بر روی مخزن انجام شود:

۱- تست پذیرش ۲- تست سیکل فشار ۳- ارتعاش یا بارگذاری خارجی ۴- تست نشت ۵- تست انفجار.

آیتم‌های تست کیفی مخازنی که مشابهت با نمونه‌های قبلی دارند می‌تواند با تأیید مقام صاحب مجوز و تیم ایمنی سایت پرتاب، کم شود. در تست‌های کیفی که باید با مجوز مقام بالادستی انجام شود، سطح بارگذاری، ترتیب، ترکیب بارها، مدت زمان اعمال بار و فشار و شرایط محیطی باید مطابق الزامات طراحی باشد [۲۱].

استاندارد AIAA S081 برای انجام تست‌های ارتعاشی به استاندارد MIL-1540 ارجاع داده است [۲۱]. با توجه به غیرفعال شدن نسخه‌های قبلی این استاندارد، استفاده از نسخه منتشر شده MIL-1540(E) پیشنهاد شده است [۲۲]. علاوه بر این استانداردها، شرایط محیط ارتعاشی برای سازه‌های فضایی در استاندارد هوایی [۲۴] و استاندارد اختصاصی ایستگاه‌های فضایی [۲۵] ذکر شده است هرچند که شرایط اختصاصی مخازن و سازه‌های تحت فشار به صورت گذرا و کلی مطرح شده است.

برای تست‌های دوره‌ی عمر، تعداد سیکل‌هایی که برای انجام تست‌ها در نظر گرفته شده بدین‌صورت است که اگر در چهار برابر دوره عمر با فشار بیشترین فشار مورد انتظار کاری یا بالاتر، تعداد سیکل‌های فشار کمتر از ۵۰ سیکل باشد باید حداقل ۵۰ سیکل رعایت شود. سیکل‌های تعریف شده از فشار صفر (که می‌تواند ۵ ٪ فشار کل باشد) تا فشار بیشینه مورد انتظار است. از طرف دیگر تمام فشارهایی که در دوره عمر بالای 0.25 × MEOP هستند نیز باید در نظر گرفته شوند [۲۱].

تست‌های انجام شده روی مخازن تحت فشار کامپوزیتی با لاینر فلزی برای ارزیابی آسیب‌های محتملی است که می‌تواند رخ بدهد و شامل: پارگی تنشی در یک فشار حساس، آسیب ضربه‌ای شناسایی نشده، نشتی خطی خالص و اعمال تنش بیش‌ازحد ناشی از بارهای ارتعاشی دینامیکی است. گسیخت

تنشی و اعمال تنش بیش‌ازحد در بارهای دینامیکی به عنوان آسیب تنشی در بارهای استاتیکی و دینامیکی مطرح هستند. نشتی خطی نیز به عنوان پارامتر دیگر آسیب است که در فاز طراحی باید با ایجاد قابلیت نشت گاز بدون محبوس ماندن پشت سطح کامپوزیتی ارزیابی شود. با توجه به مخاطرات انفجار مخازن در فاز تست و برمبنای تست‌های کیفی و انفجار صورت گرفته قبلی، با فیدبک گرفتن از فشار داخلی باید برای توقف تست و جلوگیری از وقوع انفجار برنامه ریزی کرد. نکته‌ی مهم در سطح تنش اعمالی این است که افزایش سطح تنش می‌تواند به سه علت اتفاق بیفتد:

۱- رزونانس و افزایش دامنه جابجایی

۲- خستگی ناشی از تمرکز تنش در نوک ترک‌های موجود در سازه

۳- افزایش فشار استاتیکی فشار داخل مخزن.

با توجه به چالش‌های عملیاتی و ایمنی پیش رو استفاده از راهکارهای زیر برای تست ارتعاش تصادفی مخازن کامپوزیتی تحت فشار دسته بندی می‌شود:

• استفاده از گلس بید [۳۴] یا کره‌های سبک پلی‌اتیلن [۳۵] با هدف حفظ وزن نهایی و پر کردن مخزن با گاز اصلی در فشار نهایی ولی با حجم گاز کمتر

• یکی از کارهای متداول در دنیا شناسایی میزان تنش و میزان کرنش بحرانی مخزن در تست‌های انفجاری و استفاده از آن به عنوان یک پارامتر محدودکننده حین تست ارتعاشی است [۳۶]. بدین‌صورت که کرنش در نواحی بحرانی شناسایی شده اگر از مقدار آماری به دست آمده فراتر رود تست متوقف می‌شود (شاهد این مدعا استفاده از کرنش‌سنج‌هایی است که روی نواحی بحرانی مخزن زنون تحت فشارگذاشته شده است [۲۱]).

• استفاده از سیالی با جرم معادل گاز فشرده یا حتی با کمترین جرم افزونه (استفاده از روغن به جای آب [۳۷] برای معادل سازی مخزن تحت فشار پر شده از گاز)

• انجام تست‌های استاتیکی متناوب در فشاری که بیشینه تنش مد نظر در سطح پوسته را در حین تست ارتعاش تصادفی به وجود می‌آورد و در تعداد تناوب‌هایی که تعداد آن بر اساس دوره عمر و تست‌های ارتعاشی استخراج شده است [۲۰].

• انجام تست ارتعاش تصادفی در شرایط عملیاتی روی یک تست استند طراحی شده برای تست‌های خطرناک [۱۴] (با رعایت نکات ایمنی و محافظتی برای حفظ تجهیزات تست و نیروی انسانی)

• استفاده از بازخورد نشت گاز در حین تست ارتعاشی برای شناسایی و پیش‌بینی انفجار فاجعه‌آمیز احتمالی

• استفاده از مخازن مقیاس شده[۲۱].

با توجه به موضوع این مقاله که شناسایی طرح تست‌های استاندارد و پرتکرار معتبر در حوزه تست ارتعاش تصادفی مخازن است، جمع‌بندی نتایج به صورت مدون در شکل ۵ ارائه شده است؛ بلوک مربوط به پیشنهاد "پر کردن مخزن با آب به جای گاز در فشار یکسان" و تست ارتعاشی آن با توجه به مبهم بودن میرایی سازه‌ای و میزان کاهش سطح ارتعاشی احتمالی با رنگ قرمز مشخص شده است و برای تصمیم نیازمند شبیه‌سازی و یا تست در سطح پایین‌تر و مدت کمتر است.

در ادامه با توجه به اهمیت استفاده از استاندارد در فرایندهایی که مخازن تحت فشار با آن درگیر هستند استانداردهایی که در چرخه طراحی و عمر مخازن تحت فشار فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرند اشاره شده است:

• تست ارتعاش باید در شرایط فشاری که بیشترین ارتعاشات در آن پیش‌بینی می‌شود انجام شود [۱۹].

• تجهیزات مرتبط به مخزن که در طول پرتاب کار می‌کنند، باید در طول تست نیز مطابق با شرایط نامی فعال بوده و رصد شوند [۱۹].

• بررسی کیفیت سطحی و عیوب سطحی مخازن کامپوزیتی با لاینر فلزی و کاربری فضایی در ASTM و در مرجع [۲۶] مطرح شده است که باید در ارزیابی‌های غیر مخرب لحاظ شود.

• بسته‌بندی و حمل این محموله‌های حساس بر اساس استاندارد ATA توصیه می‌شود [۲۷]. حمل مخازن گاز هیدروژن نیز مطابق استاندارد BS ISO 14623:2003 [۲۸] باید انجام شود.

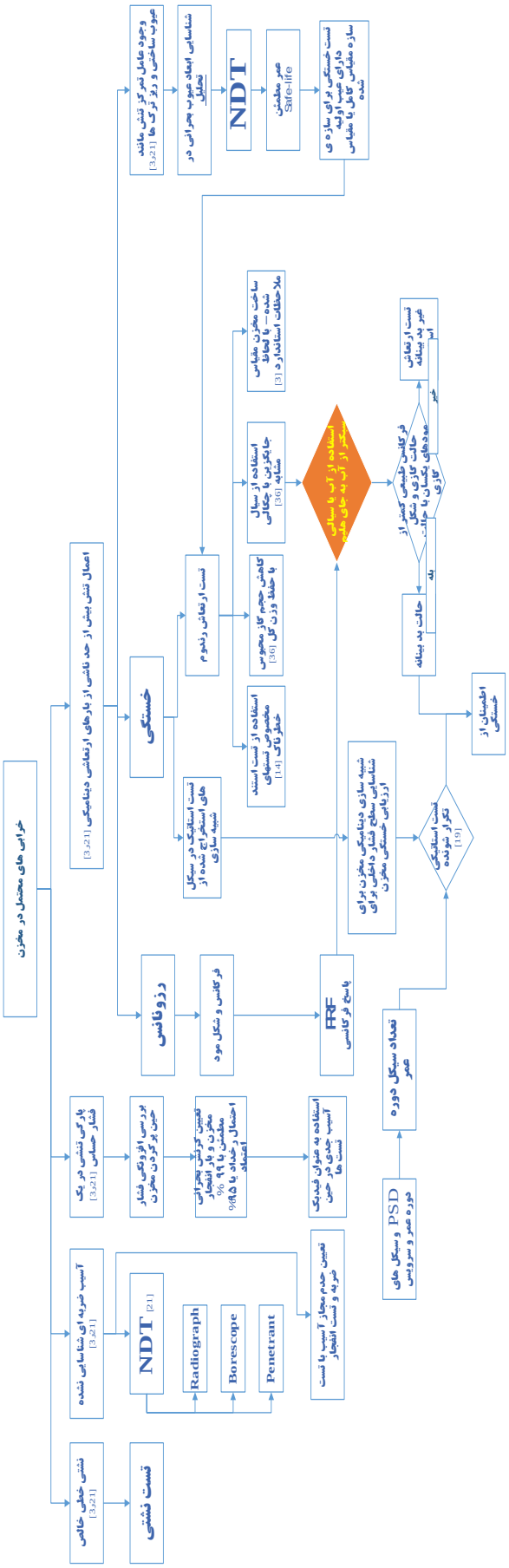
• برای ساخت و تایید نقاط حساس مخازن مانند نواحی مخروطی یا منحنی آن، استاندارد ISO [۲۹] مورد استفاده است.

• با توجه به این‌که تست با زیرساخت‌های زمینی انجام می‌شود باید برای آن زیرساخت نیز الزاماتی رعایت شود، از این رو برای مخازن زمینی با لیتراژ بالاتر از ۴۵۰ لیتر ISO استاندارد [۳۰] و NASA نیز استاندارد [۳۱] را تدوین کرده‌اند.

• برای تجمیع قطعات مخازن تحت فشار برای کاربری فضایی، استاندارد ISO-24638 [۲۲] تدوین شده است.

• طراحی بخش کامپوزیتی مخازن کامپوزیتی با لاینر فلزی بر اساس استانداردهای MIL-HDBK-17 و مرجع [۳۳] توصیه شده است.

• باتوجه به اهمیت موضوع ایمنی در تست‌ها و مخازن تحت فشار استاندارد ISO 11119-3 [۳۰] تدوین و برای کاربرد توصیه شده است.



شکل ۵ آسیب‌های مطرح برای مخازن تحت فشار COPV و روندهای تست متعارف در دنیا برای ارزیابی خطر احتمالی (استفاده از مراجع و استاندارد AIAA S081 و بررسی ایده استفاده از آب به‌جای گاز برای تست ارتعاش تصادفی)

۳- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در نهایت با توجه به موارد ذکر شده، با توجه به خطراتی که انفجار مخازن پرفشار با سیال گازی دارند، استفاده از سیال جایگزین به جای گاز بهترین گزینه از نظر ایمنی است، اگر وزن معادل نزدیک‌ترین حد به مقدار واقعی را داشته باشد، نتایج از نظر رفتار دینامیکی نیز در نزدیکترین وضعیت به نتایج واقعی خواهند بود (هرچند که میرایی سازه‌ای سیال معادل می‌تواند در سطوح پاسخ ارتعاشی تغییراتی ایجاد کند). این در حالی است که درصورت امکان استفاده از راهکار جایگزین سازی تست استاتیکی به‌جای تست دینامیکی به عنوان ایمن‌ترین راهکار خواهد بود که ریسک تلفات انسانی و مالی را به پایین‌ترین حد ممکن می‌رساند؛ البته باید توجه داشت که مدلسازی نرم‌افزاری دقیق به عنوان لازمه انجام صحیح و مطابق با واقعیت این تست خواهد بود که نیازمند تیم متخصص فنی است.

۴- مراجع

[1] Mclaughlan, P., Forth, S., Grimes-Ledesma, L., "Composite Overwrapped Pressure Vessels, A Primer", *Material science*, (2011).

[2] Escalona, A., "Design of a high-performance load sharing lined COPV for ATLAS/CENTAUR", *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, (1997).

[3] MIL-HDBK-340A (USAF), "LAUNCH, UPPER-STAGE, AND SPACE VEHICLES, Vol II: Applications Guidelines", (1999).

[4] ATK pressure vessel design team, "Qualification environments for pneumatic tank ATK P/N 80194-1", (1975).

[5] ATK pressure vessel design team, "Qualification environments for Nitrogen gas tank ATK P/N 80198-1", (1975).

[6] ATK pressure vessel design team, "Qualification environments for sphere – Helium storage, Missile - Borne ATK P/N 80218-1", (1975).

[7] ATK pressure vessel design team, "Qualification environments for tank, Ullaged gas ATK P/N 80221-1", (1974).

[8] ATK pressure vessel design team, "Qualification environments for pressurant tank ATK P/N 80295-1", (1981).

[9] ATK pressure vessel design team, "Qualification environments for Hilum re-pressurization vessel ATK P/N 80314-1", (1985).

[10] ATK pressure vessel design team, "Qualification environments for EURECA pressurant tank ATK P/N 80333-1", (1988).

[11] ATK pressure vessel design team, "Qualification environments for pressurant tank assembly ATK P/N 80345-1", (1988).

[12] Tam, W., Jackson, A., Nishida, E., Kasai, Y., Tsujihata, A., Kajiwara, K., "Design and manufacture of the ETS VIII xenon tank," 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, p. 367, (2000).

[13] Electronics Markets Materials Division, "3M Performance Fluid PF-5060, 3M Company, (2003).

[14] Fischer, B., "Vibration Testing," NASA documents: FS-2011-07-043-JSC, (2022).

[15] Schonberg, W.P., ASCE, F., "Predicting the Rupture of a COPV Impacted by a High-Speed Orbital Debris Particle: Including the Effects of Temperature and COPV Contents", *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 34 Issue 3, (2021).

[16] Chen, Z., "Mechanical Study of Carbon Fiber Reinforced Plastic and Thin-walled Metal Liner in Bi-Material COPV Based on Grid Theory Optimization", *Materials Science Forum*, Vol. 1027, p. 15-21, (2021).

[17] Tam, W. H. and Griffin, P. S., "Design and Manufacture of a Composite Overwrapped Pressurant Tank Assembly," AIAA 2002-4349, (2002).

[18] Konietzke, A. and Catherall, D., "Composite Overwrap Pressure Vessel Class 3 Acceptance

Testing – A Recommended Strategy of Airbus Defence & Space Ltd.", AIAA 4359, Session: Propellant Storage and Management II, (2019).

[19] ECSS-E-ST-32-02C_Rev.1, "Structural design and verification of pressurized hardware", 15 November (2008).

[20] Chang, Y. N. a. J. B., "COPV Standard Requirements Implementation Issues," 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Orlando, Florida, (2010).

[21] AIAA-S-081A-2006, "Space Systems – Composite Overwrapped Pressure Vessels (COPVs)", AIAA, (2006).

[22] ISS. 30558, "Fracture Control Requirements for Space Station – International Space Station", NASA Standard, (2001).

[23] SMC-TR-06-11, "Test Requirements for Launch, Upper-Stage, and Space Vehicles, Space and Missile Systems Center", (2006).

[24] SMC-S-016, "Test Requirements for Launch, Upper-Stage, and Space Vehicles, Space and Missile Systems Center", (2008).

[25] SSP 41172U, "Qualification and Acceptance Environmental Test Requirements - International Space Station Program", (2003).

[26] ASTM E 14, "Nondestructive Testing of Thin-Walled Metallic Liners in Filament-Wound Pressure Vessels Used in Aerospace Applications", (2015).

[27] ATA-300, "Packaging of Airline Supplier", (1996).

[28] BS ISO 14623, "Transportable gas cylinders - Fully wrapped carbon composite cylinders and tubes for hydrogen use", (2018).

[29] BS ISO 1119, "Geometrical product specifications (GPS) —Series of conical tapers and taper angles", (2011).

[30] ISO 11119-3," Gas cylinders — Refillable - wrapped fiber reinforced composite gas cylinders and tubes up to 450L with non-load-sharing metallic or non-metallic liners", (2013).

[31] NASA-STD-8719.17, "NASA Requirements for Ground-Based Pressure Vessels and Pressurized Systems (PVS)", (2009).

[32] ISO 24638, "Space systems - Pressure components and pressure system integration", (2008).

[33] SSP 30233F, "Space Station Requirements for Materials and Processes- International Space Station", (1998).

[34] R. J. Werlink, J. Fesmire, and J. P. Sass, "Vibration considerations for cryogenic tanks using glass bubbles insulation," AIP Conference Proceedings 1434, 55, (2012).

[35] J. Schneider, M. Dyess, C. Hastings, "Lightweight cryogenic composites over-wrapped pressure vessels (COPVs) for launch vehicle applications", AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Honolulu, Hawaii, (April 2007).

[36] W. H. Tam, A. C. Jackson, E. Nishida,Y. Kasai, A. Tsujihata, K. Kajiwara, "Design and manufacturing of the ETS VIII Xenon tank", AIAA, (2000).

[37] K. Cameron, P. Murthy, J. C. Thesken, L. Phoenixm, N. Greene, L. Grimes-Ledesma, "Unexpected shelf-life degradation phenomenon of the WSTF-JPL Carbon COPV test articles: An analysis and independent assessment", AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Honolulu, Hawaii, (2007).