

Polymerization
Quarterly, 2022
Volume 12, Number 1
Pages 53-63
ISSN: 2252-0449

An Overview of Composite Pressure Vessels with Polymer Liner

Zeinab Rouzbehani* and Mehrnoush Mohammadi

Department of Chemical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University,
P.O. Box 13651-17776, Tehran, Iran

Received: 17 July 2021, Accepted: 8 September 2021

Abstract

Pressure vessels are one of the most widely used and high-risk equipment in various industries. Pressure vessels are divided into four types based on material and structure. Weakness in design, construction and production, service and especially incorrect choice of materials are the causes of pressure vessel failure. With the introduction of composites into the world of these vessels, many design weaknesses and their mechanical properties have been improved. By using high density polymers such as polyethylene, the weight of the pressure vessel is reduced. Type IV pressure vessels with the simultaneous use of composite structure and polymer liner are able to reduce weight by up to one-fifth and double the useful life compared to the type I vessels. The advantages of the fourth type of pressure vessels are corrosion resistance, no fatigue in consecutive loads, lightness and portability, high operating pressure (700 bar) and lack of complexity of the production method, and their disadvantage is the high production cost due to the use of carbon fibers. These pressure vessels are used to store alternative fuels such as hydrogen and portable individual oxygen capsules. In this article, the pressure vessels types are briefly reviewed and the fourth type is compared with other types.

Key Words

pressure vessels,
composite structure,
polymer liner,
polyethylene,
carbon fiber

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: zeinabrouzbehani99@gmail.com

بسیار

فصلنامه علمی

سال دوازدهم، شماره ۱

صفحه ۶۳-۵۳، ۱۴۰۰

ISSN: 2252-0449

مروری بر ظروف تحت فشار کامپوزیتی با آستری پلیمری

زینب روزبهانی*، مهرانوش محمدی

تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، دانشکده فنی و مهندسی، صندوق پستی ۱۳۶۵۱-۱۷۷۷۶

دریافت: ۱۴۰۰/۴/۲۶، پذیرش: ۱۴۰۰/۶/۱۷

ظروف تحت فشار یکی از کاربردی‌ترین و پرخطرترین تجهیزات در صنایع مختلف هستند. این ظروف براساس جنس و ساختار به چهار نوع تقسیم می‌شوند. ضعف در طراحی، ساخت و تولید، کارکرد و به‌ویژه انتخاب نادرست مواد از عوامل شکست ظروف تحت فشار هستند. با ورود کامپوزیت‌ها به دنیای این ظروف، بسیاری از ضعف‌های طراحی جبران و خواص مکانیکی آن‌ها بهبود یافته است. وزن ظرف با بهره‌گیری از پلیمرهای پرچگالی مانند پلی‌اتیلن، کاهش یافته است. ظروف تحت فشار نوع چهارم با استفاده هم‌زمان از ساختار کامپوزیتی و آستری پلیمری قابلیت کاهش وزن تا یک پنجم و دو برابرشدن عمر مفید نسبت به ظروف نوع اول می‌یابند. از مزایای ظروف نوع چهارم، مقاومت در برابر خوردگی، عدم خستگی در بارگذاری‌های پیاپی، سبک و قابل حمل بودن، فشار عملیاتی زیاد (700 bar) و عدم پیچیدگی روش تولید بوده و از معایب آن، هزینه تولید زیاد به‌واسطه استفاده از الیاف کربن است. از این ظروف در ذخیره سوخت‌های جایگزین نظیر هیدروژن و کپسول‌های اکسیژن فردی قابل حمل استفاده می‌شود. در این مقاله، انواع ظروف تحت فشار به‌طور اجمالی مرور شده و نوع چهارم با سایر انواع دیگر مقایسه شده است.

چکیده



زینب روزبهانی



مهرانوش محمدی

واژگان کلیدی

ظروف تحت فشار،
ساختار کامپوزیتی،
آستری پلیمری،
پلی‌اتیلن،
الیاف کربن

مقدمه

ظروف تحت فشار یکی از پراهمیت‌ترین تجهیزات در صنایع مختلف است که معمولاً از آن‌ها برای اهدافی مانند ذخیره‌سازی مواد شیمیایی، سوخت‌های جایگزین، گازهای تنفسی و آزمایشگاهی استفاده می‌شود. ابعاد، ملاحظات اقتصادی، دردسترس بودن و انتخاب مناسب مواد، روش ساخت، خوردگی ذاتی، شرایط عملیاتی و نظریه‌های شکست از مواردی هستند که باید در طراحی ظروف تحت فشار مدنظر قرار گیرند [۱]. حادثه کارخانه Grover Shoe در Brockton ماساچوست در سال ۱۹۰۴ و شکست فاجعه‌بار بویلر تحت فشار در SS Norway میامی در سال ۲۰۰۳ که به کشته شدن ۸ نفر منجر شد، یادآور پرخاطر بودن این ظروف است [۲]. عوامل شکست ظروف تحت فشار (جدول ۱) از ۴ نقطه نظر مواد، طراحی، ساخت و کارکرد بررسی می‌شوند [۱].

معرفی انواع ظروف تحت فشار

ظروف نوع اول

ظروف نوع اول، تمام‌فلزی از جنس فولاد کروم-مولیبدن، فولاد کربن-منگنز یا آلومینیم بی‌درز و جوش به‌کمک روش‌های اکستروژن‌کردن معکوس و کشش عمیق از شمش لوله یا ورق تولید می‌شوند [۳]. این نوع ظروف بیشترین وزن و کمترین قیمت تمام‌شده را در میان انواع ظروف ذخیره تحت فشار دارند [۴، ۵].

ظروف نوع دوم

ظروف نوع دوم، از آستری فلزی آلومینیمی یا فولادی بی‌درز با الیاف تقویت‌کننده شیشه یا کربن آغشته به رزین پیچیده به دور قسمت استوانه‌ای ظروف تولید می‌شوند. قسمت فلزی این ظروف

جدول ۱- عوامل شکست ظروف تحت فشار [۱].

مواد	خوردگی (ترک‌برداری که ردیابی آن دشوار است)، تردی و شکنندگی مواد به‌دلیل دمای زیاد و انتخاب نامناسب مواد و خرابی در اثر خزش و خستگی
طراحی	طراحی اشتباه ظروف، داده‌های طراحی نادرست، عدم تشخیص زودهنگام ضعف در طراحی، اجرای ضعیف شیر ایمنی و ترکیب نامناسب محتویات در ظروف
ساخت و تولید	کیفیت ضعیف جوشکاری، خطای ساخت، محصول متفاوت با مشخصات استاندارد، مونتاژ نامناسب و فرایند ساخت اشتباه
سرویس	اپراتور بی‌تجربه، تعمیر و نگهداری ضعیف ظروف، تغییر وضعیت کارکرد، کارکردن در بیش از فشار و دمای کاری، ترمیم نادرست نشتی و تنش بیش از حد

نسبت به ظروف نوع اول نازک‌تر و در نتیجه ظروف وزن کمتر و قیمت تمام‌شده بیشتری دارند [۴]. در ظروف نوع دوم بار بین آستری و الیاف نصف می‌شود [۶].

ظروف نوع سوم

ظروف نوع سوم دارای آستری فلزی با ضخامت کمتر نسبت به نوع اول و دوم از فولاد یا آلومینیم با سطح پوشیده از الیاف و ماتریس تولید می‌شوند. معمولاً از الیاف کربن و ماتریس اپوکسی به‌عنوان لایه کامپوزیتی در این نوع ظروف استفاده و بار آن‌ها به‌وسیله مواد کامپوزیتی حمل می‌شود [۵، ۶].

ظروف نوع چهارم

ظروف نوع چهارم مشابه با نوع سوم هستند، با این تفاوت که لایه آستری آن‌ها از مواد پلیمری گرماسخت است. بهره‌گیری از پلیمرها مانند پلی‌اتیلن پرچگالی، وزن ظرف را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد و بار همانند ظروف نوع سوم به‌وسیله مواد کامپوزیتی حمل می‌شود [۳، ۶]. ظروف نوع پنجم نیز وجود دارند که نسبت به انواع پیشین آستری کمتری دارند و کاملاً کامپوزیتی هستند. ظروف نوع پنجم، قابلیت ذخیره گاز با فشار کم را داشته و نیاز به پژوهش و توسعه دارد [۴، ۶]. شکل ۱، انواع ظروف تحت فشار و جدول ۲ مشخصات هر یک از آن‌ها را نشان می‌دهند [۷، ۸].

ظروف تحت فشار نوع چهارم با بهره‌گیری از ساختار کامپوزیتی و آستری پلیمری، کمترین وزن، بیشترین فشار عملیاتی و عمر مفید را در میان سایر انواع ظروف تحت فشار دارند. از این رو، از آن‌ها به‌عنوان ظروف ذخیره سوخت در وسایل نقلیه، کپسول‌های اکسیژن فردی قابل حمل و غیره استفاده می‌شود.

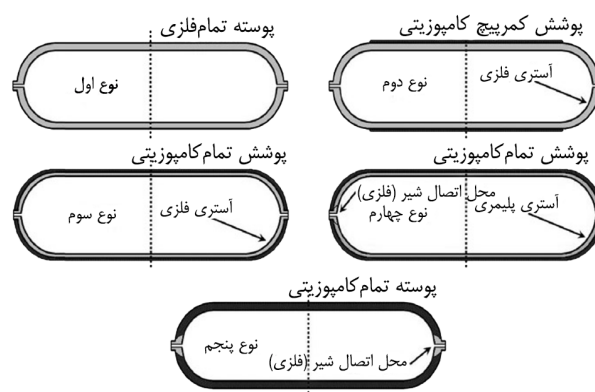
ضربه، جایگزین کامپوزیت های گرماسخت شده اند [۳]. جدول ۳ اجزای تشکیل دهنده مواد کامپوزیتی را نشان می دهد [۱۲].

اجزای ظروف تحت فشار نوع چهارم الیاف

الیاف آرامید، شیشه و کربن به عنوان تقویت کننده در ساختار کامپوزیتی ظروف به کار می روند [۱۲]. الیاف آرامید، زنجیری از پلیمرها هستند که موجب استحکام، سختی و افزایش طول این الیاف می شوند. الیاف آرامید در برابر روان سازها، دماهای زیاد و مواد شیمیایی مقاومت خوبی دارند، اما قابلیت جذب رطوبت را ندارند که باعث عدم چسبندگی این الیاف به رزین های زمینه می شود. الیاف شیشه، قیمت و خواص مکانیکی مناسبی دارند و در برابر رطوبت آسیب پذیرند که باعث کاهش استحکام و مقاومت به ضربه این الیاف می شود. علت گران بودن الیاف کربن، استفاده بیش از ۹۰٪ پلی آکریلونیتریل در ساختار آن هاست. الیاف کربن در دمای بیش از ۱۵۰ °C به مدت طولانی، استحکام و شکل خود را حفظ می کنند و در برابر رطوبت، محلول ها، بازها و اسیدهای ضعیف در دمای محیط مقاوم هستند. بدین دلیل در ظروف نوع چهارم از الیاف کربن یا ترکیبی از آن با آرامید استفاده می شود [۳]. Robert در سال ۲۰۱۹ در کنفرانس Composite World (CW) Carbon Fiber پیش بینی کرده است که تقاضا برای الیاف کربن در ظروف تحت فشار کامپوزیتی از t ۱۴۹۵۰ به t ۱۹۵۰۰ در سال ۲۰۲۰ می رسد [۶].

آستری و روش تولید آن

لایه داخلی ظروف یا همان آستری، محفظه ای برای تجمع گاز و



شکل ۱- انواع ظروف تحت فشار [۷].

مروری بر کامپوزیت ها

کامپوزیت ها از الیاف تقویت کننده و ماتریس تشکیل شده اند که این اجزا با حفظ خواص شیمیایی و فیزیکی دارای مرز مشخصی با یکدیگر هستند [۹]. الیاف تقویت کننده نقش افزاینده استحکام سازه کامپوزیتی و ماتریس نقش اتصال الیاف، توزیع بار بین الیاف، تشکیل سطح سخت برای محافظت از الیاف تقویت کننده و شکل دهی مناسب به محصول نهایی را دارند [۱۰، ۱۱]. الیافی مانند شیشه، گرافن، بازالت، آرامید که با سنتز شیمیایی تولید می شوند، الیاف مصنوعی یا سنتزی نامیده می شوند. الیاف با منبع گیاهی یا حیوانی مانند کتان، کنف، پشم بز را الیاف طبیعی می نامند [۹]. ماتریس به دو نوع گرماسخت و گرمانرم تقسیم می شود. ماتریس های گرماسخت به کمک پخت شیمیایی برگشت ناپذیر به منظور ایجاد مخلوط بی شکل و ماتریس های گرمانرم با گرمایش تا دمای فرایند و ایجاد محصولات به شکل دلخواه تولید می شوند. پلیمرهای گرمانرم به دلیل مقاومت بیشتر در برابر ترک برداری و خسارات ناشی از

جدول ۲- مشخصات انواع ظروف تحت فشار [۸].

نوع ظروف	مواد	ویژگی	فشار (MPa)
اول	تمام فلزی	وزن زیاد و خوردگی درونی	۱۷/۵-۲۰
دوم	آستری فلزی با کمربند الیاف	عمر کم و خوردگی درونی	۲۶/۳-۳۰
سوم	آستری فلزی با پوشش کامپوزیتی	سبک، فشار ترکیدگی زیاد، خوردگی گالوانی بین آستری و الیاف، ۲۵٪ تا ۷۵٪ سبک تر از ظروف نوع اول و دوم	۳۵-۷۰
چهارم	آستری پلاستیکی با پوشش کامپوزیتی	سبک، فشار ترکیدگی کم، نفوذ از طریق آستری، ساخت آسان، عمر بیشتر نسبت به ظروف نوع سوم	۷۰

جدول ۳- اجزای مواد کامپوزیتی [۹].

افزودنی‌ها یا پرکننده‌ها		الیاف تقویت کننده	ماتریس	
			گرماسخت	گرمانرم
کلسیم کربنات	سخت کننده	شیشه E	پلی پروپیلن	پلی آمیدها
کائولن	کاتالیزگر	شیشه D	پلی اکسی متیلن	پلی کربنات‌ها
کوارتز	روان ساز	شیشه R	پلی استرها	پلی استرها
سیلیکا	عامل رهاسازی	سیلیکون	پلی اتر سولفون	فنولیک‌ها
میکا	ضداکسنده	بور	پلی اتر اتر	پلی ایمیدها
هیدرات‌های آلومینیم	ضد فرابنفش	سیلیکون کاربید	پلی اتر کتون	سیلیکون‌ها
پلیمرهای طبیعی	رنگ دانه‌ها	کربن	پلی اتر اتر کتون	پلی یورتان‌ها
نانولوله‌های کربن	قارچ کش	آرامید	پلی اتر ایمید	پلی اپوکسیدها

به کارگیری این پلی اتیلن، خرابی و شکست مخزن را حتی در حداکثر فشار مجاز سوخت گیری محدود می کند. از سوی دیگر، الیاف کربن از تغییر شکل آستری در دمای زیاد حین سوخت گیری جلوگیری می کنند. نتایج به دست آمده از این پژوهش حاکی از هماهنگی خوب آستری پلی اتیلن پرچگالی و ساختار کامپوزیتی ظروف بوده است [۱۶].

پلی آمیدها، گروه دیگری هستند که به عنوان آستری در ظروف تحت فشار نوع چهارم کاربرد دارند. استحکام زیاد، مقاومت به ضربه و سایدگی کم و سازگاری با ماتریس پلیمری از ویژگی های این پلیمرهاست [۱۴]. نتایج به دست آمده از آستری پلی آمید ۶ (PA6) برپایه رزین نشان می دهد، این ماده در دماهای کم ($^{\circ}\text{C}$ ۴۰-) و فشارهای عملیاتی زیاد عملکرد بسیار خوبی دارد [۱۷].

روش های متعددی مانند اکستروژن، قالب گیری چرخشی، قالب گیری بادی یا ترکیبی از آن ها به منظور تهیه آستری ظروف استفاده می شوند. این روش، به دلیل عدم اتصال و جوشکاری روی آستری، عدم وجود کشش داخلی در سازه، قابلیت تنظیم ضخامت دیواره، هزینه کم و امکان تولید نمونه های پیچیده عاری از تنش در فشار کم، برای تهیه آستری توصیه می شود [۱۳].

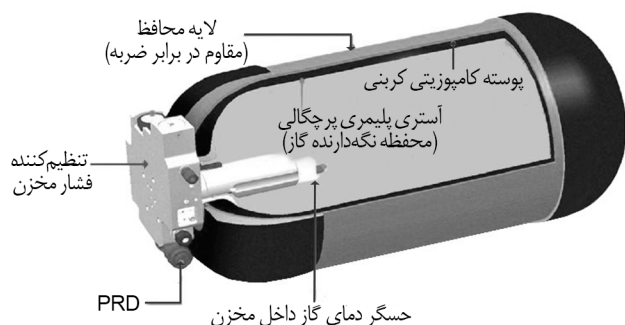
در روش قالب گیری چرخشی، محصول نهایی با چرخش هم زمان و زیاد بودن دما تا حدود $^{\circ}\text{C}$ ۲۰۰، در قالب شکل می گیرد. پلیمرهای مدنظر برای آستری مانند پلی اتیلن یا پلی آمید به منظور تشکیل هندسه خارجی آستری به صورت گرانول در قالب ریخته می شوند و طی فرایند مواد روی دیواره های قالب قرار می گیرند. ضخامت دیواره های آستری با مقدار گرانول قرار گرفته در

شکل دهی به کل سازه ظروف است. این لایه باید به اندازه کافی محکم باشد تا از نفوذ ذرات گاز بیش از حد مجاز (مطابق با استانداردهای الزام آور، نفوذ هیدروژن از دیواره ظروف تا زمانی مجاز است که از $6\text{ Ncm}^3/\text{h}$ تجاوز نکند) به خارج از محفظه جلوگیری کند [۱۳]. کمترین نفوذپذیری ممکن، عدم واکنش پذیری با ماده ذخیره شده درون ظرف (هیدروژن و بحث خوردگی آن)، شکل گیری آسان و امکان اصلاح هندسه از ویژگی های یک آستری مدرن است [۱۳]. روش تولید انعطاف پذیر، فراهم کردن کمترین نفوذپذیری گاز ذخیره شده درون محفظه به خارج و مقاومت در برابر تغییرات دما از دلایلی است که پلیمرهایی مانند پلی اتیلن پرچگالی، پلی آمید، پلی اکسی متیلن و کوپلیمر اتیلن وینیل الکل به عنوان لایه آستری در ظروف تحت فشار نوع چهارم استفاده شده اند [۱۳، ۱۴].

پلی اتیلن پرچگالی (شکل ۲)، گرمانرم مقرون به صرفه با ساختار خطی است که در دمای کم ($^{\circ}\text{C}$ ۷۰-۳۰۰) و فشار ۱۰ bar تا ۸۰ bar تولید می شود [۱۵]. ویژگی هایی مانند انعطاف پذیری، استحکام کششی زیاد و هزینه کم در مقایسه با سایر اشکال پلی اتیلن، موجب استفاده از آن به عنوان آستری در ظروف تحت فشار نوع چهارم شده است [۱۳، ۱۵]. در بررسی تجربی و شبیه سازی ظروف تحت فشار نوع چهارم تقویت شده با الیاف کربن T 700S و استفاده از پلی اتیلن پرچگالی به عنوان آستری، Sapre و همکاران دریافتند،



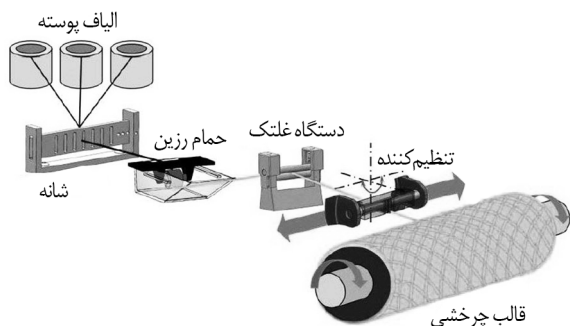
شکل ۲- ساختار مولکولی پلی اتیلن پرچگالی [۱۵].



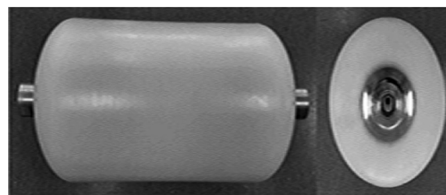
شکل ۴- ظروف نوع چهارم به همراه اجزای آن‌ها [۱۹].

فولاد زنگ‌نزن یا آلومینیم به صورت یک نوار جمع می‌شوند. الیاف آغشته به رزین هنگام خروج از محفظه رزین، از یک قسمت پاک‌کننده به منظور برداشتن رزین اضافی از روی سطح آن‌ها و کنترل پوشش عبور داده می‌شوند. سپس نوار از الیاف به دور مندرل پیچیده می‌شود که می‌تواند پلاستیکی، لاستیکی یا فلزی باشد. مندرل می‌تواند پس از این فرایند در کوره قرار گیرد، خشک شود و سپس به وسیله بیرون‌اندازهای مکانیکی یا هیدرولیکی از درون محصول خارج شود [۳]. در شکل ۴ مخزن نوع چهارم و اجزای آن [۱۹] و در شکل ۵، روش رشته پیچی نشان داده شده است [۷].

نرم افزار Cadwind از شرکت Material، به منظور شبیه سازی زاویه پیچش الیاف، الگوی مناسب پیچش و غیره استفاده می‌شود. محصولات تولیدی با فناوری رشته پیچی رباتیک نسبت استحکام به وزن مطلوبی دارند. از مزایای این روش، داشتن چشم انداز توسعه وسیع، مقرون به صرفه بودن و بازده زیاد است [۲۰، ۲۱]. شکل ۶، نماهای حاصل از طراحی با این نرم افزار را نشان می‌دهد [۷]. نوع الیاف و اندازه آن، سرعت پیچش، دمای رزین، زاویه پیچش، مقدار کشش الیاف، عرض نوار الیاف، دمای آستری، نوع رزین و ترکیب آن از جمله پارامترهایی هستند که باید با حاشیه اطمینان مشخص در طول فرایند رشته پیچشی کنترل و ثبت شوند [۳].



شکل ۵- روش رشته پیچی [۷].



شکل ۳- آستری از جنس پلی اتیلن پرچگالی [۱۳].

داخل دستگاه کنترل می‌شود. در طول مرحله خنک سازی، که تا رسیدن به دمای محیط به داخل قالب ادامه می‌یابد، فشار زیادی دیواره‌های آستری تازه ساخته شده را به دیواره‌های قالب می‌راند. بنابراین، از فروپاشی هنگام انقباض جلوگیری می‌کند و پس از فرایند خنک سازی محصول نهایی از قالب خارج می‌شود [۱۳]. از عوامل مؤثر بر قالب گیری چرخشی می‌توان به اندازه ذرات پلیمر (قطر $150 \mu m$ تا $500 \mu m$)، محدوده دمای ذوب، سرعت جریان ذوب (مقدار مناسب بین $3 g/10 min$ تا $4 g/10 min$) و توزیع مناسب وزن مولکولی اشاره کرد [۱۸]. شکل ۳، آستری از جنس پلی اتیلن پرچگالی تهیه شده به روش قالب گیری چرخشی را نشان می‌دهد [۱۳].

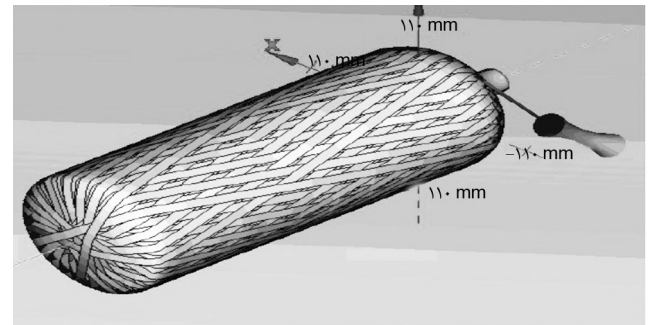
افزودنی‌ها

لایه رزین اپوکسی برای محافظت و چسبندگی الیاف، استفاده از مواد جامد به منظور اصلاح خواص فیزیکی، رنگ‌دانه‌ها و بازدارنده‌های فرابنفش از جمله افزودنی‌هایی هستند که در تهیه ظروف کامپوزیتی با آستری پلیمری به کار می‌روند [۳].

روش تولید ظروف نوع چهارم

رشته پیچی

روش رشته پیچی برای تولید قطعات کامپوزیتی ساخته شده برپایه پلیمر و همچنین کامپوزیت‌هایی با سطح مقطع گرد و متقارن محور مانند سیلندرهای گاز استفاده می‌شود. در ابتدا تعداد زیادی از الیاف پیچیده شده به دور قرقره‌ها کشیده می‌شوند. سپس، وارد حمام دارای رزین و سایر اجزای ترکیبی مانند رنگ‌دانه‌ها و بازدارنده‌های فرابنفش می‌شوند. کشش، الگوی پیچش و جهت قرارگیری الیاف عامل تعیین کننده استحکام ساختار است. از میان سه الگوی مارپیچ، حلقوی و قطبی، روش مارپیچ قابلیت تنوع و تغییر بیشتری دارد. کشش الیاف به وسیله میله‌های راهنما یا تقسیم کنترل می‌شود. معمولاً الیاف پیش از ورود یا پس از خروج از محفظه رزین، با عبور از تخته شیاردار یا شانه فلزی از جنس



شکل ۶- نمای حاصل از نرم افزار Cadwind [۷].

مقایسه ظروف نوع چهارم با انواع پیشین

خواص مکانیکی

در ساختارهای کامپوزیتی هر دو جزء اصلی یعنی تقویت کننده و ماتریس، سامانه واحدی را تشکیل می دهند، در حالی که در هم حل یا ادغام نمی شوند. هر یک از این اجزا، دارای خواص مکانیکی منحصر به فردی هستند. هنگامی که اجزا با یکدیگر ترکیب می شوند، خواصی در کامپوزیت ایجاد می شود که هر جزء به تنهایی فاقد آن است. از سوی دیگر، برای قرارگیری اجزای تقویت کننده، نوع الیاف و سایر پارامترها نظیر شکل قالب در تعیین خواص و استحکام ساختار کامپوزیتی تعیین کننده هستند [۳]. برای مثال کامپوزیت های الیاف پلی آرامید، ۵ برابر محکم تر از فولاد هستند [۴]. در روش رشته پیچی الیاف، امکان تعیین و بهبود خواص مکانیکی، تنش و غیره با تغییر و تعیین جهت، مقدار کشش و نوع الیاف وجود دارد [۳]. سیدی و همکاران [۲۲]، با تغییر متغیرهایی همچون ضخامت لایه آستری، نوع پیچش الیاف و سایر پارامترهای تحت فشار کاری به کاهش ۲۰٪ وزن ظروف نوع چهارم و تغییر شکل آن ها دست یافتند. حیدری و همکاران [۲۳]، با تحلیل تنش یک مخزن کامپوزیتی تقویت شده با الیاف کربن، اپوکسی و آستری PA6 نشان دادند، تعداد لایه های کم پیچ خارجی نقش اساسی در فشار ترکیدگی مخزن دارند.

جدول ۴- مقایسه وزن، هزینه به ازای هر لیتر بین انواع ظروف [۴].

نوع سیلندر	جنس	وزن هر لیتر (kg)	هزینه (\$/L)
نوع اول	فلزی	۱-۰/۸	۵-۳
نوع دوم	کامپوزیت با آستری فلزی ضخیم (الیاف محیطی)	۰/۵۲-۰/۸۶	۷-۵
نوع سوم	کامپوزیت با آستری فلزی نازک	۰/۴۵-۰/۴۱	۱۴-۹
نوع چهارم	تمام کامپوزیتی با آستری پلیمری تمام پیچ	۰/۳۹-۰/۳	۱۸-۱۱

وزن

ظروف نوع دوم و سوم به ترتیب ۳۰٪ و ۷۵٪ نسبت به ظروف نوع اول سبک تر هستند [۴]. ظروف نوع چهارم نسبت استحکام به وزن زیادی دارند که به کاهش وزن نهایی ظرف نسبت به نسل های گذشته و همچنین افزایش فشار ترکیدگی آن منجر می شود [۲۳]. ظروف نوع چهارم ۳۰٪ سبک تر از نوع سوم (کامپوزیت با آستری آلومینیمی) و ۵ بار سبک تر از ظروف فولادی هستند [۴]. علت سبک تر بودن ظروف نوع چهارم، استفاده از پلیمرهای سبک، مانند پلی اتیلن کم چگالی به عنوان آستری در آن هاست [۳]. وزن کم ظروف نوع چهارم، امکان نصب چند مخزن و ذخیره حجم بیشتر سوخت را امکان پذیر می کند. Shelley [۲۴] در پژوهش خود دریافت، استفاده از تقویت کننده نانولوله های کربن باعث افزایش استحکام در ظروف نوع چهارم بدون تغییر یا افزایش وزن می شود. جدول ۴، مقایسه هزینه و وزن بین انواع ظروف است [۴].

هزینه

کامپوزیت های پیشرفته پلیمری، هزینه ساخت و تولید زیادی دارند [۱۰]. به طور کلی، ۵۰٪ تا ۷۰٪ از هزینه های تولید ظروف نوع دوم، سوم و چهارم مربوط به مواد کامپوزیتی است [۲۵]. تجزیه و تحلیل هزینه ظروف نوع سوم و چهارم نشان داده است، ۴۰٪ از کل هزینه به مواد اولیه الیاف کربن نسبت داده می شود [۲۲]. هزینه تولید ظروف نوع دوم، نسبت به ظروف نوع اول ۵۰٪ بیشتر است. از سوی دیگر، هزینه های تولید ظروف نوع چهارم ۳/۵ برابر ظروف نوع اول و ۲ برابر ظروف نوع دوم است [۴]. الیاف طبیعی سبک و اقتصادی هستند، ولی به دلیل عدم پیوستگی و استحکام کششی لازم از آن ها در تولید ظروف تحت فشار و لوله ها استفاده نمی شود. روش هایی به منظور اصلاح، بهبود استحکام کششی و چسبندگی بهتر الیاف طبیعی و ماتریس مانند روش پلاسما و عمل آوری قلیایی وجود دارد. برای کاهش هزینه های

ناشی از الیاف مصنوعی می‌توان ترکیبی از الیاف طبیعی و سنتزی مانند کربن را به همراه روش‌های بهبود خواص و نقاط ضعف الیاف طبیعی استفاده کرد. Shrigandhi و همکاران [۲۶] دریافتند، مخزن کامپوزیتی با الیاف تقویت کننده کربن T 700S و کتان افزون بر کاهش وزن، اقتصادی نیز هست.

خوردگی

خوردگی آسیب مکانیکی است که باعث تخریب یا فاسدشدن ماده در اثر واکنش با محیط اطراف آن می‌شود. خوردگی، مشکلات اقتصادی، زیست محیطی و ایمنی درخور توجهی را به وجود می‌آورد [۲۷]. در ظروف نوع اول (تمام فلزی) خوردگی سطحی، حفره‌ای، خطی، بین دانه‌ای و گالوانیکی بسیار رایج است. به منظور جلوگیری از خوردگی سطحی، ظروف جدید فلزی با اپوکسی پوشش دهی می‌شوند. اپوکسی گران قیمت است، ولی مقاومت بسیار خوبی در برابر مواد شیمیایی و محلول‌ها دارد [۲۸]. در ظروف نوع دوم، خوردگی سطحی گنبد‌های فلزی می‌تواند باعث خوردگی حفره‌ای شود و ضخامت دیواره را کاهش دهد. به منظور جلوگیری از خوردگی در ظروف نوع دوم، استفاده از رنگ‌های ضد زنگ توصیه می‌شود [۲۹]. خوردگی همراه با تنش، نتیجه اعمال بار و محیط خورنده است. در ظروف نوع سوم و چهارم این نوع خوردگی می‌تواند باعث ترک برداری یا تکه تکه شدن الیاف شود. خوردگی همراه با تنش در ظروف تقویت شده با الیاف شیشه در مجاورت اسیدهای خورنده مانند کربنیک اسید یا اسید باتری متداول است [۲۸، ۲۹]. در صورت استفاده از الیاف کربن در ظروف نوع دوم و سوم با آستری فولادی، امکان خوردگی گالوانیکی وجود دارد. در این نوع ظروف، استفاده از الیاف سازگار با فلز آستری توصیه شده است. در کپسول‌های اکسیژن قابل حمل نوع سوم، خوردگی درونی حاصل از تماس اکسیژن با فلز آستری، متداول است. اکسیدهای ایجاد شده در کپسول می‌تواند باعث آسیب جدی به فرد شود [۳۰]. ظروف نوع چهارم با آستری پلیمری و الیاف تقویت کننده کربن و آرامید مقاوم در برابر خوردگی و سازگار با هوا، نیتروژن، گاز طبیعی و مخلوط‌های آن‌ها هستند [۲۹].

عمر مفید

عمر مفید ظروف برای ایمن بودن باید توسط سازنده براساس شرایط کاری تعیین شده در این بخش مشخص شود. حداکثر عمر مفید ظروف فلزی نوع اول و دوم نباید از ۱۵ سال بیشتر باشد. عمر مفید ظروف نوع سوم و چهارم با انجام آزمون‌های

غیرمخرب و فراصوت تعیین می‌شود [۲۹]. ظروف تحت فشار نوع سوم و چهارم تقویت شده با الیاف کربن می‌توانند تا ۳۰ سال عمر مفید داشته باشند که دو برابر ظروف نوع اول و دوم است [۳۱]. تمام اجزای ظروف نوع اول و آستری ظروف نوع دوم و سوم بازیافت پذیر هستند، به جز بخش کامپوزیتی آن‌ها که از رزین‌های گرماسخت تهیه می‌شوند و به راحتی تجزیه نمی‌شوند [۵].

بارگذاری

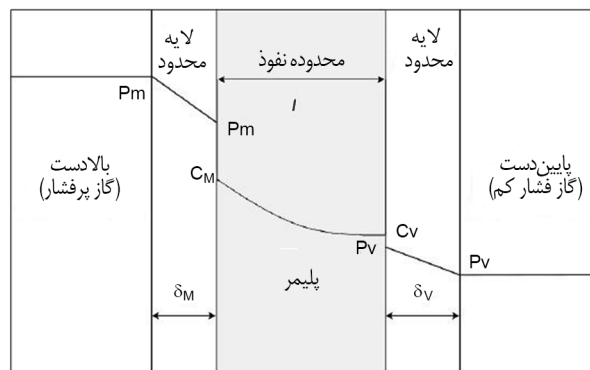
فشار داخلی یا خارجی، وزن ظرف، بارهای استاتیکی ناشی از لوله و تجهیزات متصل به ظرف، بارهای مربوط به تغییرات فشار یا دمای ظرف و اثر خزش از بارگذاری‌هایی هستند که روی ظروف تحت فشار مشاهده می‌شود. تنش‌های کششی، فشاری و پوسته اولیه از تنش‌های وارد شده به ظروف تحت فشار است.

نحوه شکست ظروف کامپوزیتی تحت بارگذاری فشاری هیدروستاتیک با توجه به هندسه و خواص مواد، قابل تعیین است. به کارگیری مواد کامپوزیتی در سازه‌هایی مانند ظروف تحت فشار، مستلزم شناخت رفتار آن‌ها در شرایط عملیاتی است. مطالعات موردی و پژوهشی بسیاری بر رفتار استاتیکی و دینامیکی ظروف تحت فشار کامپوزیتی انجام شده است [۳۲].

علیزاده و همکاران [۳۲] در پژوهشی، عملکرد تقویت کننده‌های فولادی در ظروف کامپوزیتی تحت فشار هیدروستاتیک خارجی، مقدار فشار لازم برای وقوع کماتش در حالت استفاده یا عدم استفاده تقویت کننده فلزی را بررسی کردند. آن‌ها در بررسی عددی دریافتند، بیشترین‌های به وجود آمده در بدنه در درونی ترین لایه‌ها ایجاد می‌شود، بدین دلیل اولین لایه دچار شکست می‌شود. Moon و همکاران [۳۳]، کماتش ظروف کامپوزیتی جدار ضخیم ساخته شده به روش رشته پیچی را در فشار هیدروستاتیک خارجی و نیروی محوری برای کاربردهای زیرآبی با استفاده از روش اجزای محدود و تجربی و همچنین اثر زاویه‌های مختلف پیچش الیاف را بر کماتش مطالعه کردند. آن‌ها دریافتند، پوسته استوانه‌ای پوشش یافته با زاویه $[60/90 \pm]$ در برابر فشار هیدروستاتیک خارجی، تغییر شکل‌های محوری و جانبی بیشتری دارد. به بیان دیگر، پوسته در برابر فشار بحرانی کماتش، مقاومت می‌کند. همچنین آنان نشان دادند، کماتش پوسته‌های استوانه‌ای به تغییرات جابه جایی وابسته است. این تغییرات وابسته به زوایای الیاف و پیش آن است.

نفوذپذیری

یکی از کاربردهای ظروف تحت فشار کامپوزیتی با آستری پلیمری،



شکل ۷- سازوکار نفوذ گاز در پلیمر [۳۴].

ذخیره سازی هیدروژن در خودروهای دارای سلول الکتریکی است. نفوذپذیری زیاد هیدروژن از آستری پلیمری، مشکلی جدی در این ظروف است. سازوکار نفوذ هیدروژن در پلیمرها با فرض اینکه پلیمر در دمای معین همگن و نامتخلخل است را می توان با مدل نفوذ محلول توصیف کرد. ابتدا گاز از طریق لایه محدود در بالادست (سمت فشار زیاد) نفوذ می کند و سپس از طریق میل شیمیایی و حل پذیری به وسیله پلیمر جذب می شود. در مرحله بعد، گاز درون پلیمر جذب و در پایین دست (سمت کم فشار) دفع می شود. شکل ۷، سازوکار نفوذ گاز را نشان می دهد [۳۴].

روش تحلیل واجذب گرمایی (TDA)، آزمون نفوذ گاز هیدروژن پرفشار (HPHP) از آزمون هایی هستند که برای بررسی نفوذ هیدروژن در آستری پلیمری انجام می شوند. Su و همکاران [۳۴] در پژوهش خود، روش HPHP را برای اندازه گیری مقدار نفوذ هیدروژن در شرایط فشار زیاد مناسب تر دانسته اند. کاهش نفوذ هیدروژن و بررسی رفتار آن بسیار مهم است و بیشتر آزمون های انجام شده درباره این موضوع به علت انجام در فشار کم به اندازه کافی جامع نبوده است.

نتیجه گیری

- از ظروف نوع چهارم به عنوان مخزن ذخیره سوخت جایگزین هیدروژن، به دلیل وزن کم و فشار عملیاتی زیاد (۷۰۰ bar) به سبب وجود ساختار کامپوزیتی و آستری پلیمری، استفاده می شود. کاهش

وزن ظروف ذخیره در وسایل نقلیه جاده ای، امکان نصب چند مخزن را به منظور افزایش ذخیره سوخت ایجاد می کند. از سوی دیگر، باعث افزایش ظرفیت بار در کامیون ها می شود.

- ظروف کامپوزیتی تقویت شده با الیاف کربن و آستری پلیمری، در برابر خوردگی مقاوم هستند. استفاده از ظروف نوع چهارم به عنوان کپسول های اکسیژن فردی قابل حمل به جای ظروف نوع سوم، مشکل خوردگی بین آستری آلومینیمی و اکسیژن را برطرف می کند.

- الیاف کربن، استحکام کششی را افزایش و مقدار خستگی در بارگذاری های پیایی را کاهش می دهد. به طوری که ظروف نوع چهارم تقویت شده با الیاف کربن می تواند ۳۰ سال عمر مفید داشته باشد که ۲ برابر عمر مفید ظروف نوع اول و دوم است.

- روش تولید این ظروف (روش تهیه آستری و پیچش الیاف) ساده است و امکان طراحی ظروف با ویژگی های مدنظر کاربر و خواص بهبود یافته در اندازه و شکل های مختلف با تغییر در پارامترهای اثرگذار وجود دارد.

- نوع، زاویه پیچش و محل قرارگیری الیاف، اثر زیادی بر مقدار کمایش، تنش و مقاومت ظروف در برابر بارگذاری های مختلف دارد.

- هزینه زیاد تولید ظروف نوع چهارم به علت استفاده از الیاف کربن در ساختار کامپوزیتی آن است. به منظور کاهش مصرف الیاف کربن، ترکیبی از الیاف طبیعی با الیاف سنتزی پیشنهاد شده است. - برای شناخت بهتر رفتار آستری و نفوذ هیدروژن از آن، انجام ارزیابی مفصل از خواص فیزیکی و شیمیایی پلیمر مناسب برای آستری در محیط هیدروژنی فشار زیاد پیشنهاد می شود.

- به طور کلی، با در نظر گرفتن مزایای ظروف تحت فشار کامپوزیتی با آستری پلیمری، این ظروف می توانند جایگزین های بسیار خوبی برای نسل های پیشین ظروف تحت فشار باشند.

- بررسی رفتار مکانیکی ظروف تحت فشار نوع چهارم، تقویت شده با ترکیبی از الیاف طبیعی و سنتزی به منظور کاهش هزینه های تولید، مطالعه جنبه های مختلف استفاده از این ظروف در ابعاد بزرگ تر به منظور ذخیره مواد شیمیایی خورنده، مدل سازی و بررسی سازوکار نفوذ از لایه پلیمری تعدادی از جمله موضوعاتی است که برای پژوهش های آتی پیشنهاد می شود.

مراجع

1. Toudehdehghan A., and Wai-Hong T.A., A Critical Review and Analysis of Pressure Vessel Structures, *IOP Conf. Ser: Mater. Sci. Eng.*, **469**, 012009, 2019.
2. Jegatheesan J. and Zakaria Z., Stress Analysis on Pressure Vessel, *Environ. Ecosyst. Sci. (ESS)*, **2**, 53-57, 2018.
3. Paul R.J., *The Development of Lightweight Composite Cylinders for Use in Demanding Structure Application*, MS Thesis, The Manchester University, School of Material, UK, 2011.
4. Khan M.I., Yasmin T., and Khan N.B., Safety Issues Associated with the Use and Operation of Natural Gas Vehicles: Learning from Accidents in Pakistan, *J. Braz. Soc. Mech. Sci.*, **38**, 2481-2497, 2015.
5. Eskandari Jam J. and Yaghoubi M.S., *Introduction to the Design of Type II CNG Tanks (Persian)*, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, 5-52, 2013.
6. Sloan J., The Markets: Pressure Vessels, <https://www.compositesworld.com/articles/the-markets-pressure-vessels-2021>, available in July 2021.
7. Kartav O., Design and Production of Light-Weight Pressure Resistant Composite Tank Materials and Systems for Hydrogen Storage, *PQDT-Global*, 2020.
8. Li M., Bai Y., Zhang C., Song Y., Jiang S., Grouset D., and Zhang M., Review on the Research of Hydrogen Storage System Fast Refueling in Fuel Cell Vehicle, *Int. J. Hydrogen Energ.*, **44**, 10677-10693, 2019.
9. Rajak D.K., Pagar D.D., Menezes P.L., and Linul E., Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications, *Polymers*, **11**, 1667-1704, 2019.
10. Woodruff J., Advantages and Disadvantages of Polymer Composites, <https://homesteady.com/13653187/advantages-disadvantages-of-polymer-composites.htm>, available in November 2018.
11. Paśtuszak P.D. and Muc A., Application of Composite Materials in Modern Construction, *Key. Eng. Mater.*, **542**, 119-129, 2013.
12. Hsissoun R., Seghiri R., Benzekri Z., Hilali M., Rafik M., and Elharfi A., Polymer Composite Materials: A Comprehensive Review, *Compos. Struct.*, **262**, 113640, 2021.
13. Gasior P., Wacharczyk K., Blachut A., Kaleta J., Yadav N., Ozga M., and Baron A., Validation of Selected Optical Methods for Assessing Polyethylene (PE) Liners Used in High Pressure Vessels for Hydrogen Storage, *Appl. Sci.*, **11**, 5667, 2021.
14. Murry B.R., *Characterization of Rotationally Moulded Polymer Liners For Low Permeability Cryogenic Applications in Composite Overwrapped Pressure Vessels.*, PhD Thesis, National University of Ireland Galway, Galway, Ireland, 2016.
15. Polyethylene (PE)-Complete Guide, <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyethylene-plastic>, available in 2021.
16. Spare S., Pareek K., and Vysa M., Investigation of Structural Stability of Type IV Compressed Hydrogen Storage Tank During Refueling of Fuel Cell Vehicle, *J. Energy Stor.*, **2**, e150, 2020.
17. Villalonga S., Thomas C., Nony C., Thiebaud F., Geli M., Lucas A., Knobloch K., and Maugy C., Application of Full Thermoplastic Composite for Type IV 70 MPa High Pressure Vessels, *18th International Conference on Composite Materials (ICCM-18)*, Korea, 2011.
18. Barboza Neto E.S., Ceolho L.A.F., Forte M.M.C., Amico S.C., and Ferreira C.A., Processing of a LLDPE/HDPE Pressure Vessel Liner by Rotomolding, *J. Mater. Res.*, **17**, 236-241, 2014.
19. Kunowsky M., Marco-lozar J.P., and Linares-Solano A., Material Demands for Storage Technologies in a Hydrogen Economy, *J. Renew. Energy*, **2013**, Article ID 878329, 2013.
20. Guo K., Wen L., Xiao J., Lei M., Wang S., Zhang C., and Hou X., Design of Winding Pattern of Filament Wound Composite Pressure Vessel with Unequal Openings Based on Non-Geodesics, *J. Eng. Fiber. Fabr.*, **15**, 1-17, 2020.
21. Clarich A., Wen Z., and Fratti G., Design Optimization, Cost and Risk Analysis of CNG Vessels Transportation, *14th WCCM-ECCOMAS Congress (Virtual)*, 2021.
22. Seyedi S.M., Naddaf Oskouei A., and Sayah Badkhor M., Experimental, Numerical and Optimization Study of Composite Tanks with Non-metallic Primer (CNG Fourth Type), *Modares Mech. Eng. (Persian)*, **20**, 1789-1800, 2020.
23. Heidari Rarani M., Ahmadi Jabeli M., and Baniasadi E., Burst Modeling of Type 4 High Pressure Storage Vessel (Persian), *The 5th International Conference on Composite*, Tehran, 20-21 December, 2016.
24. Shelley D.A., *Carbon Nanotube Reinforcement in Composite Cylinders*, MS Thesis, Naval Postgraduate School Monterey, California, December 2020.
25. Berro Ramirez J.P., Halm D., Grandidier J.C., Villalonga S., and Nony F., 700 bar Type VI High Pressure Hydrogen Storage Vessel Burst-Simulation and Experimental Validation, *Int. J. Hydrogen Energ.*, **40**, 13183-13192, 2015.
26. Shrigandhi G.D. and Kothavale B.S., Biodegradable Composites for Filament Winding Process, *Mater. Today*, **42**, 2762-2768, 2021.
27. Fontana M.G., *Corrosion Engineering*, McGraw Hill, USA, 3rd ed., 15-80, 2005.
28. Momeni A. and Lotfi Haghighat M., Investigation of Types

- of Corrosion and Its Causes in CNG Tanks, *4th CNG International Conference and Exhibition*, Tehran, 23-25 July, 2011.
29. Gas Cylinders-High Pressure Cylinders for the on Board Storage of Natural Gas as a Fuel for Automotive Vehicles, ISO 11439:2013, 2nd ed., 2013.
 30. Cho S.M., Kim D.E., Seong H.J., Ko Y.K., Kim H.C., Lee K.O., Jo M.S., and Lyu S.K., Development of a Type 4 Composite Cylinder for Self-Contained Breathing Apparatus, *J. Korean Soc. Manuf. Process Eng.*, **18**, 1-6, 2019.
 31. Pressure Vessels for Alternative Fuels 2014-2023, <https://www.compositesworld.com/articles/pressure-vessels-for-alternative-fuels-2014-2023>, available in December 2014.
 32. Alizadeh E., Babaei J., Batalebluie R., and Behrooz H., Numerical and Experimental Study of Reinforced Composite Vessels with Hoop Stiffeners Under External Hydrostatic Pressure, *J. Model. Eng.*, **16**, 339-349, 2018.
 33. Moon J.C., Kim I.H., Choi B.H., Kweon J.H., and Choi J.H., Buckling of Filament-Wound Composite Cylinders Subjected to Hydrostatic Pressure for Underwater Vehicle Applications, *Compos. Struct.*, **92**, 2241-2251, 2010.
 34. Su Y., Lv H., Zhou W., and Zhang C., Review of the Hydrogen Permeability of the Liner Material of Type IV On-Board Hydrogen Storage Tank, *World Electr. Veh.*, **12**, 130, 2021.