

**واژه‌های کلیدی:**

مخازن گاز تحت فشار (CNG)

مخازن کامپوزیتی

فرایند الیاف پیچی

مخازن نوع ۳ و ۴

**مخازن کامپوزیتی گاز طبیعی فشرده**

زهرة طاهرخانی\*

تهران، دانشگاه تهران، دانشکده فنی، جهاد دانشگاهی، گروه پژوهشی طراحی فرایندهای شیمیایی

**چکیده ...**

مخازن گاز تحت فشار کاربردهای وسیعی در صنایع مختلف به‌ویژه صنعت هوافضا، صنعت خودروسازی، صنایع پتروشیمی و غیره کسب کرده‌اند. مخازن تحت فشار صنعتی از فلزات سنتی مانند فولادها و آلیاژهای آلومینیوم ساخته شده‌اند. از آنجا که وزن مخزن در عملکرد آن نقش حیاتی دارد، با گذشت زمان رویکرد صنایع مختلف به سمت استفاده از مخازن سبک کامپوزیتی به‌دلیل جلوگیری از استهلاک و کاهش مصرف سوخت به‌ویژه در صنایع حمل‌ونقل تغییر پیدا کرده است. عوامل موثری بر پارامترهای طراحی و خواص مکانیکی این مخازن موثر هستند که دستیابی به مخزن بهینه را فراهم می‌کنند. در مطالعه حاضر، انواع مختلف مخازن گاز طبیعی فشرده معرفی شده و روش‌های ساخت اجزای آن‌ها بیان می‌شود. سپس با توجه به اهمیت و کاربرد فراوان مخازن کامپوزیتی نوع ۳ و ۴، عوامل موثر بر خواص و کارکرد آن‌ها برای تعیین شرایط بهینه طراحی با ارائه مطالعات اخیر بررسی می‌شود. نتایج حاصل نشان داده است که نوع الیاف، زاویه الیاف پیچی، الگو، توالی و تعداد لایه‌های کامپوزیت به‌کاررفته، جنس آستر و دما از موارد مهم و موثر بر خواص نهایی مخزن تولید شده هستند که باید در طراحی مخازن کامپوزیتی مورد توجه قرار گیرند.

\*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

ZTaherkhani@gmail.com

## ۱ مقدمه

جمع‌کننده‌ها، مخازن ذخیره سلول هیدروژن، مخزن اکسیژن، انتقال لوله و غیره در مقیاس بزرگ استفاده می‌شوند [۴-۵]. در ایران نیز با توجه به داشتن منابع وسیع گاز طبیعی (دارا بودن ۱۷ درصد از ذخایر گاز طبیعی دنیا) و سیاست‌گذاری‌های دولت در این بخش، جایگزینی سوخت‌های فسیلی با گاز CNG به ویژه در خودروها در حال انجام است. با این حال همچنان از مخازن فلزی نوع اول با وزن بالا استفاده می‌شود که باعث افزایش مصرف سوخت و استهلاک خودرو می‌شود. لذا هدف از این پژوهش، معرفی جامع انواع مختلف مخازن CNG و فناوری ساخت آن‌ها است. سپس مخازن کامپوزیتی و پارامترهای موثر بر آن، به منظور ساخت مخزن با خواص مکانیکی مناسب با بررسی مقالات اخیر پژوهشگران بحث می‌شود.

## ۲ مخازن ذخیره‌سازی گاز طبیعی فشرده (CNG)

### ۱-۲ مخازن نوع ۱ (تمام فلزی)

از دهه ۱۹۴۰، مخازن فولادی بدون درز (مخازن نوع ۱) بیش‌ترین استفاده را برای ذخیره CNG در وسایل نقلیه داشته‌اند. معرفی مخازن با استحکام و سبک ایتالیایی در اواخر دهه ۱۹۷۰ گام بسیار مهمی در پیشرفت صنعت مخزن گاز بود و از آن زمان تاکنون این نوع محصول در سراسر جهان پذیرفته شده است. این مخازن بیشتر از جنس آلومینیوم یا فولاد کروم-مولیبدن یا فولاد کربن-منگنز ساخته می‌شوند. مخازن آلومینیومی نیز برای ذخیره‌سازی CNG استفاده شده است و می‌تواند وزن سبک‌تری را ایجاد کند. مخزن‌های نوع ۱ به دلیل خواص مکانیکی عالی و خاصیت نفوذناپذیری در برابر گازها از کارکرد مناسبی برخوردار هستند. وزن این مخازن بین ۱/۱-۰/۹ کیلوگرم به ازای هر لیتر است [۲، ۵، ۶]. تصویر انواع مخازن مختلف در شکل ۱ نشان داده شده است.

### ۲-۲ مخازن نوع ۲ (مخزن کامپوزیت کمر پیچ با آستر فلزی ضخیم)

مخازن نوع ۲ دارای آستر فلزی از جنس فولاد یا آلومینیوم بدون درز هستند که قسمت استوانه‌ای آن توسط الیاف تقویت‌کننده شامل الیاف آرامید، شیشه و کربن به صورت محیطی پوشیده شده است. مخازن نوع ۲ به گونه‌ای طراحی می‌شوند که به دلیل ساختار کامپوزیتی دارای آستری با ضخامت کم‌تر از مخزن نوع ۱ هستند و مقاومت کافی برای مهار فشار کاری را به دلیل بخش الیاف دارا هستند. وزن این مخازن بین ۱/۴ - ۰/۷ کیلوگرم به ازای هر لیتر است [۲، ۵، ۶].

علاقه جهان به جایگزینی انرژی به دلیل کاهش منابع طبیعی، گرم شدن کره زمین و آلودگی محیط زیست رو به افزایش است. در میان انرژی‌های جایگزین، گاز طبیعی به احتمال زیاد انرژی سازگار با محیط زیست برای جایگزینی سوخت فسیلی است [۱]. گاز طبیعی فشرده (CNG) به عنوان یکی از انرژی‌های پرتقاضا در آینده در نظر گرفته می‌شود و می‌تواند به عنوان سوخت در بسیاری از کاربردها مورد استفاده قرار گیرد. به منظور استفاده از گاز در کاربردهای مختلف و به ویژه وسایل نقلیه، باید زیرساخت‌های مناسب و امکانات ذخیره سازی فراهم شود. گاز تحت فشار زیاد به عنوان سوخت، فشرده می‌شود و نیاز به ایجاد سامانه ذخیره‌ای دارد که بتواند سوخت را با بیش‌ترین فشار ممکن برای مسافت طولانی‌تر ذخیره کند [۱-۲]. ذخیره‌سازی گاز CNG باید درجه ایمنی بالایی داشته باشد و همچنین سهولت استفاده از نظر چگالی انرژی و دینامیک ذخیره سوخت و انتشار کنترل شده را فراهم کند [۳].

امروزه از مخازن گاز مختلفی برای ذخیره‌سازی گاز به ویژه در وسایل نقلیه استفاده می‌شود. مخازن ذخیره‌سازی گاز طبیعی فشرده (CNG) مورد استفاده در وسایل نقلیه، مخازنی تحت فشار هستند که به طور سنتی با استفاده از فولاد و آلومینیوم تولید می‌شوند. مخازن اولیه نوع ۱، کاملاً فلزی بوده و برای ذخیره سازی CNG بسیار سنگین بودند. امروزه در دنیا رویکرد به سمت استفاده از مخازن سبک کامپوزیتی به دلیل جلوگیری از استهلاک ماشین و کاهش مصرف سوخت است. به همین دلیل مخازن نازک‌تر و سبک‌تر نوع ۲ از طریق تقویت مخزن توسط فرایند رشته پیچی در قسمت استوانه‌ای ساخته شدند. در ادامه، دو نوع مخزن دیگر نیز از آستر فلزی/تقویت‌کننده کامپوزیتی (نوع ۳) و آستر پلاستیک-تقویت‌کننده کامپوزیت (مخزن نوع ۴) توسعه داده شدند. مخازن نوع ۴ دارای مزایایی مانند وزن پایین، استحکام، مقاومت در برابر خستگی خوب و مقاومت در برابر خوردگی (در صورت عدم وجود اجزای فلزی)، هدایت حرارتی کم و رفتار غیرمغناطیسی هستند و همچنین رفتار مکانیکی، استحکام ضربه و مقاومت خوردگی مخزن تحت فشار را بهبود می‌دهند.

مخازن نوع ۳ (با آستر فلزی) و نوع ۴ (با آستر پلیمری) برای ذخیره‌سازی گاز هیدروژن در ۳۵۰-۷۰۰ bar در تعدادی از نمونه‌های اولیه وسایل نقلیه با پیل سوختی استفاده شده‌اند. این مخازن علاوه بر کاربرد در وسایل نقلیه، در بسیاری از کاربردهای صنعتی و غیرصنعتی مانند صافی‌های مایع و

## ۲-۵ مخازن نوع ۵ (مخازن تمام کامپوزیتی بدون آستر)

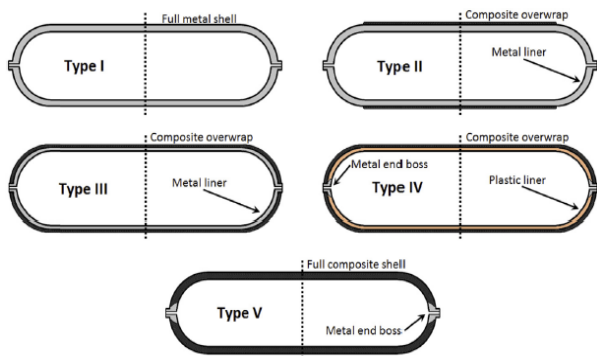
مخازن نوع ۵ در واقع مخزن‌های بدون آستر هستند و تنها از لایه کامپوزیتی مقاوم ساخته می‌شوند. این مخازن کم‌ترین وزن را در مقایسه با سایر مخازن به دلیل عدم وجود لایه آستری دارند، اگر چه قیمت آن‌ها به دلیل استفاده بیش‌تر از مواد بخش کامپوزیتی گران‌تر است. در حال حاضر استاندارد مشخصی برای مخازن نوع ۵ تدوین نشده است و این مخازن در کاربردهای صنعتی استفاده نشده‌اند [۵، ۷].

با توجه به اهمیت و کاربرد صنعتی فراوان مخازن نوع ۳ و ۴ در دنیا، در ادامه فرایند تولید و پارامترهای موثر بر خواص این مخازن با مروری بر پژوهش اخیر بررسی می‌شود.

## ۳ بررسی روش تولید مخازن نوع ۳

### ۳-۱ فرایند تولید آستری مخازن

مخازن نوع ۱ یا آستری مخازن نوع ۲ و ۳ از ماده خام اولیه در سه شکل لوله، ورق و شمش ساخته می‌شوند و فرایند ساخت این قطعات بسته به نوع مواد اولیه، مراحل تولید مختلفی را به دنبال دارد. استفاده از لوله، معمول‌ترین روش تولید برای مخازن است. در این روش، لوله آلومینیومی یا فولادی تا دمای مناسب در کوره القایی گرم شده و سپس برای بستن یک سر لوله، تحت عملیات شکل‌دهی چرخش قرار می‌گیرد. در ادامه، داخل مخزن صاف‌کاری شده و تحت عملیات شکل‌دهی چرخشی (فلو فرمینگ) قرار می‌گیرد. در مرحله بعد، بازرسی اولتراسونیک برای اطمینان از یکنواختی ضخامت مخزن انجام می‌شود و در انتها گلویی با استفاده از روش شکل‌دهی چرخشی ساخته می‌شود. پس از اتمام فرایند شکل‌دهی، به منظور افزایش مقاومت در برابر ضربه‌های احتمالی و همچنین از بین بردن



شکل ۱ انواع مخازن گاز تحت فشار [۲].

## ۲-۳ مخازن نوع ۳ (مخزن کامپوزیتی کاملاً پیچیده شده با آستری فلزی نازک)

مخازن گاز نوع ۳ دارای آستر داخلی از جنس فولاد یا آلومینیوم با ضخامت کم هستند که توسط الیاف آغشته به رزین به صورت «کاملاً پیچیده» روی همه سطوح در راستای محیطی و محوری تقویت می‌شوند. در مخازن نوع ۳ جهت پیش‌ش الیاف در قسمت استوانه‌ای به صورت زاویه‌دار بوده و در تمام سطح آن ثابت است. این الیاف بین ۷۵ تا ۹۰ درصد مقاومت مخزن را تأمین می‌کند. آستر، بقیه مقاومت را فراهم می‌کند؛ به علاوه به عنوان غشای سخت و محکم برای نگه‌داری گاز و ایجاد مقاومت بیش‌تر در برابر ضربه به محصول عمل می‌کند.

مخازن نوع سوم اولین بار در دهه ۷۰ برای گاز اکسیژن مورد استفاده در صنایع پزشکی ساخته شدند. اما امروزه بیش از ۲ میلیون مخزن کامپوزیتی نوع ۳ در کاربردهای قابل حمل مانند دستگاه تنفس، ذخیره اکسیژن پزشکی و هواپیما وجود دارد. وزن این مخازن بین ۰/۴ - ۰/۳۵ کیلوگرم به ازای هر لیتر است [۲، ۵، ۶].

## ۲-۴ مخازن گاز نوع ۴ (مخازن تمام کامپوزیتی با آستری پلیمری CNG-IV)

مخازن گاز نوع ۴، متشکل از آستر پلاستیکی پلیمری و لایه بیرونی از مواد کامپوزیتی (الیاف آغشته به رزین) است. آستر مخازن نوع ۴ هیچ مقاومت ساختاری برای محصول ندارد و فقط به عنوان مانع در برابر نفوذ عمل می‌کند. مخازن نوع چهارم بر اساس نوع الیاف مورد استفاده در لایه کامپوزیتی به سه نوع مخازن نوع چهارم با الیاف شیشه‌ای، مخازن نوع چهارم با الیاف کربنی و مخازن نوع چهارم با الیاف ترکیبی تقسیم‌بندی می‌شوند. وزن این مخازن بین ۰/۳ - ۰/۳۵ کیلوگرم به ازای هر لیتر است. به همین دلیل مخازن نوع ۴ در مواردی که وزن حائز اهمیت است مانند اتوبوس‌ها، کامیون‌ها و وسایل نقلیه استفاده می‌شود.

احتمال ترکیدگی بسیار پایین این مخازن در مقایسه با سایر مخازن، آن‌ها را به مخازن بسیار پراهمیت در مباحث ذخیره‌سازی گاز تبدیل کرده است. این نوع مخازن قابلیت استفاده در خودروهای گازسوز را دارا هستند و پتانسیل طراحی برای کاربرد در طول عمرهای طولانی را نیز از خود نشان داده‌اند. به طوری که آزمون‌های خستگی مرتبط به تعداد فراوانی از این مخازن، قابلیت سوخت‌گیری تا ۱۰۰۰۰۰۰ چرخه را نیز نشان داده است [۲، ۵، ۶].

اگر چه کامپوزیت‌های ساخته شده به این روش محدودیت‌هایی مانند مقاومت به ضربه، مقاومت به عوامل محیطی، ضریب دی‌الکتریک و انبساط حرارتی پایینی دارند. همچنین مقاومت برشی پایین بین لایه‌های مختلف در این کامپوزیت‌ها، خواص نهایی سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به منظور ساخت بخش کامپوزیتی مخازن با فرایند الیاف پیچی، الیاف در ابتدا با استفاده از شانه‌ای از جنس فولاد ضد زنگ به صورت نوار در آمده، سپس از حمام رزین مایع (شامل رزین، کاتالیزور، رنگدانه‌ها و مواد افزودنی) عبور می‌کنند و عمل کشش بر روی آن‌ها انجام می‌شود. این کشیدگی، در پارامترهای مقاومت و سفتی کامپوزیت تأثیر دارد. پس از خروج الیاف از حمام، رزین اضافی آن‌ها توسط غلتک‌های فشاری جدا شده، الیاف آغشته شده به رزین به صورت محیطی، محوری، مارپیچی یا ترکیبی از آن‌ها به دور آسترها پیچیده می‌شوند. سپس مخزن از دستگاه خارج شده، تحت فرایند پخت رزین قرار می‌گیرد. شرایط پخت رزین شامل زمان و دمای پخت، خصوصیات نهایی مخزن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به همین منظور، کنترل دقیق شرایط پخت اهمیت فراوان دارد. این موضوع دستیابی به خواص تعیین شده در مرحله طراحی را تضمین می‌کند. پس از فرایند پخت، مخازن از کوره خارج و بسته‌بندی می‌شوند و قابلیت انجام مراحل بعدی را دارند [5].

دو رزین اپوکسی و فنولیک متداول‌ترین نوع رزین مورد استفاده در ساخت مخازن هستند و مواد افزودنی مانند سیلیکات آلومینیوم، کربنات کلسیم و تری‌هیدرات آلومینیوم نیز معمولاً در حمام رزین استفاده می‌شوند. پرمصرف‌ترین الیاف مورد استفاده در فرایند الیاف پیچی مخازن نیز عبارتند از الیاف کربن، الیاف شیشه و الیاف آرامید. با این حال، الیاف شیشه به دلیل قیمت و خواص مکانیکی مناسب، نسبت به سایر

تنش‌های باقی مانده عملیات شکل‌دهی، فرایندهای سرد کردن سریع و بازپخت بر روی مخازن انجام می‌شود.

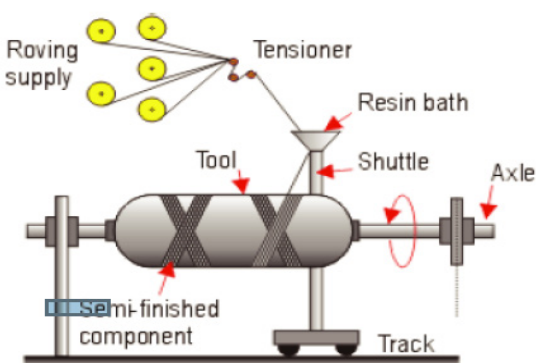
در روش استفاده از ورق، ورق‌های فولادی با استفاده از دستگاه برش لیزری به شکل دایره، بریده می‌شوند. در هنگام برش باید دقت شود که کم‌ترین ترک‌های احتمالی و تنش‌های فشاری در ورق ایجاد شود. سپس ورق‌ها تحت عملیات روغن کاری قرار می‌گیرند که در مراحل بعدی دچار آسیب دیدگی نشوند. در ادامه، ورق‌ها قبل از این‌که تحت فرایند کشش سرد قرار گیرند، عملیات حرارتی بر روی آن‌ها انجام می‌شود. پس از فرایند کشش عمیق سرد، مخازن مجدداً تحت عملیات حرارتی قرار گرفته، سپس بازکشش بر روی آن‌ها انجام می‌شود تا مخزن به ابعاد مورد نظر برسد. در ادامه، مخزن تحت فرایند اتوکاری قرار می‌گیرد. در این مرحله حالت استوانه‌ای مخزن آماده شده، در ادامه مشابه با روش لوله عمل می‌شود.

در روش تولید با استفاده از شمش نیز، در ابتدا شمش فولادی یا آلومینیومی در طول مناسب برش زده شده و سپس تا حدود  $2300^{\circ}\text{F}$  حرارت داده شده و با آهنگری به صورت مخزن، شکل داده می‌شود. در ادامه فرایند سوراخ کاری بر روی شمش انجام می‌شود. مخازن شکل گرفته مجدداً وارد کوره شده تا دمای  $2300^{\circ}\text{F}$  گرم می‌شوند و ضخامت آن‌ها با استفاده از عملیات کشش تنظیم می‌شود. سایر مراحل شکل‌دهی چرخشی و ساخت گلویی مانند روش لوله است [8].

در مخازن نوع ۱، همین آستری تولید شده به عنوان مخزن نهایی استفاده می‌شود. اما در سایر مخازن، فرایند الیاف پیچی بر روی آستر برای ساخت لایه کامپوزیتی انجام می‌شود که در ادامه توضیح داده می‌شود.

## ۳-۲ فرایند تولید لایه کامپوزیتی مخازن با استفاده از فرایند الیاف پیچی

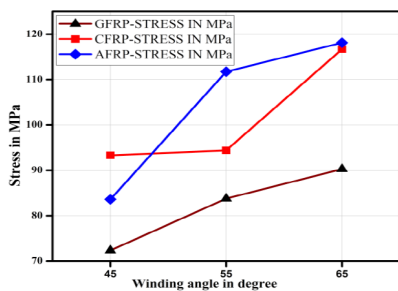
قسمت کامپوزیتی مخزن که از الیاف کربنی، شیشه‌ای یا هیبرید با لایه‌های مختلف ساخته می‌شود، توسط فرایند الیاف پیچی تولید می‌شود (شکل ۲). در این روش، فرایند الیاف پیچی با شکل هندسی معین روی محور استوانه، کره و ... انجام می‌شود که منجر به تولید سازه‌هایی با نسبت بالای استحکام به وزن می‌شود. فرایند الیاف پیچی، فرایند کنترل عددی رایانه‌ای (CNC) است و به طراحان این امکان را می‌دهد تا با بررسی دقیق خواص مکانیکی مواد و تغییر متغیرهای لازم، مخازن با استحکام، سفتی و مقاومت گرمایی بهینه تولید کنند. در واقع تعریف دقیق شرایط مناسب به منظور دستیابی به خواص مورد نظر، پایه و اساس این فرایند است.



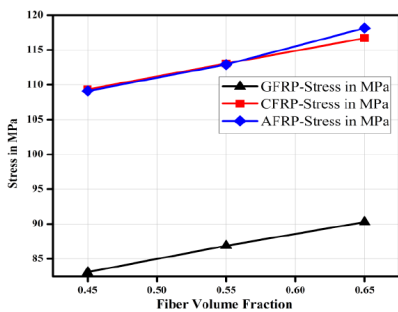
شکل ۲ نحوه پیچش الیاف در ساخت مخازن نوع ۳ و ۴ [5].

## ۵ عوامل موثر بر خواص مخازن کامپوزیتی

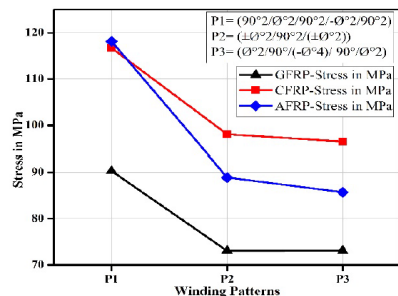
بیرادار و همکاران [۱۰] تأثیر عوامل مختلفی مانند زاویه الیاف پیچی، طرح الیاف پیچی و کسر حجمی الیاف را بر ایجاد تنش در مخازن کامپوزیتی با سه نوع از الیاف شیشه (GFRP)، الیاف کربن (CFRP) و الیاف آرامید (AFRP) بررسی کرده، آن را با مخازن فلزی مقایسه کردند. شکل ۳ تأثیر زاویه الیاف پیچی، کسر حجمی الیاف و الگوی الیاف پیچی را بر تنش ایجاد شده نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زاویه الیاف-پیچی و کسر حجم الیاف، میزان تنش افزایش می‌یابد. به طوری که، در زوایای مختلف، میزان تنش در مخازن CFRP و AFRP در مقایسه با مخازن تحت فشار GFRP به طور غیریکنواخت افزایش می‌یابد. در حالی که در نمودار مرتبط به کسر حجمی الیاف، تغییر خطی در مقادیر تنش‌ها مشاهده می‌شود. نتایج شکل ۳ نشان می‌دهد که الگوی الیاف پیچی ۱، در مقایسه با دو الگوی دیگر، تنش بالاتری را ایجاد می‌کند. این رفتار



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۳ تأثیر (الف) زاویه الیاف پیچی، (ب) کسر حجمی الیاف و (ج) الگوی الیاف پیچی بر تنش [۱۰].

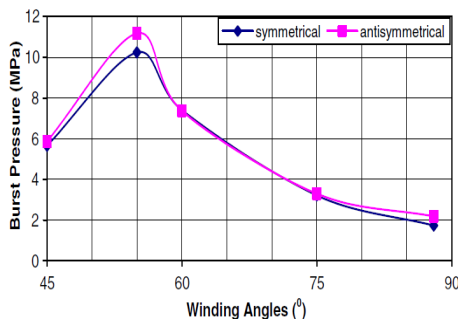
الیاف، مصرف بالاتری دارند. الیاف کولار نیز خواص مکانیکی، مقاومت حرارتی و مقاومت شیمیایی خوبی دارند و در برابر خستگی مقاوم هستند. اما به دلیل جذب رطوبت پایین، مانع از چسبندگی مناسب الیاف به رزین‌های زمینه می‌شود. الیاف کربن بیشترین استحکام و مدول را بین الیاف‌ها دارند و انتخاب آن‌ها با توجه به خواص خستگی عالی، نسبت بالای مقاومت به وزن و عدم حساسیت به شرایط محیطی مورد توجه است [۵].

## ۴ بررسی روش تولید مخازن نوع ۴

مخازن نوع ۴ از چهار بخش اصلی آستر پلیمری، قسمت کامپوزیتی، نافی فلزی و ساختار کاهش آسیب تشکیل شده‌اند. این مخازن دارای آستری از جنس پلیمرهایی بدون درز نظیر پلی اتیلن سنگین (HDPE) و نایلون هستند که به عنوان مانع در مقابل فشار گاز عمل می‌کنند. در حال حاضر، پلی اتیلن سنگین به دلیل خصوصیات مطلوب و قیمت پایین تر نسبت به نایلون در ساخت آستر مخازن نوع ۴ مورد توجه بیشتر است.

این آستر توسط الیاف مختلفی مانند الیاف شیشه، آرامید، کربن و آغشته به رزین در جهت شعاعی و محوری تقویت می‌شود. در این مخازن برای تولید آستری مخازن نوع ۴ روش‌های مختلفی وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها شامل قالب‌گیری چرخشی، قالب‌گیری تزریقی، قالب‌گیری اکستروژنی و قالب‌گیری دمشی است. روش قالب‌گیری چرخشی، متداول‌ترین روش مورد استفاده برای تولید آستر پلیمری مخازن نوع ۴ است. در این روش پلیمر مورد استفاده (پلی اتیلن یا نایلون) به قالبی با دیواره نازک و قابلیت انتقال حرارت بالا وارد می‌شود و در داخل کوره، تحت حرارت قرار می‌گیرد. سپس قالب در جهات مختلف می‌چرخد و پلیمر ذوب شده تمام سطح قالب را می‌پوشاند و در نهایت قالب تحت چرخش به آرامی خنک شده تا آستر مورد نظر ساخته شود. این عمل باعث می‌شود که ضخامت آستری در تمام سطوح آن یکنواخت باشد.

بخش مهم بعدی در این مخازن، نافی فلزی است. نافی فلزی در واقع وسیله ارتباطی برای ورود و خروج گاز از مخزن به تأسیسات خارجی را فراهم می‌کند. جنس نافی‌ها معمولاً از آلایژ آلومینیوم ۶۰۶۱ یا فولاد است و در شکل‌های مختلف ساخته می‌شود. طراحی مناسب نافی باعث آب‌بندی مخزن در قسمت اتصال بخش پلیمری و فلزی شده و از نشتی گاز جلوگیری می‌کند. بخش کامپوزیتی مخزن نوع ۴ نیز دقیقاً مشابه با بخش کامپوزیتی مخزن نوع ۳ از لایه الیاف آغشته به رزین با استفاده از فرایند الیاف پیچی ساخته می‌شود. بخش عمده فشار داخلی مخزن نوع ۳ توسط الیاف کامپوزیتی تحمل می‌شود [۲، ۵، ۶، ۹].

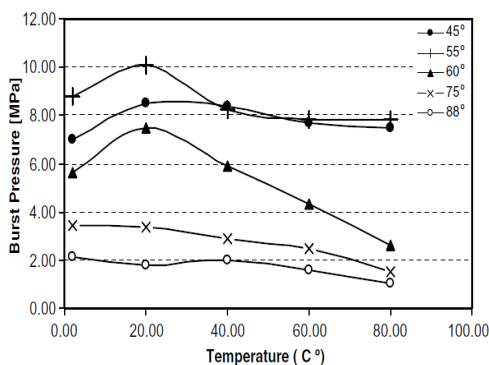


شکل ۵ تغییر فشار تخریب مخزن با زاویه الیاف پیچی [۱۱].

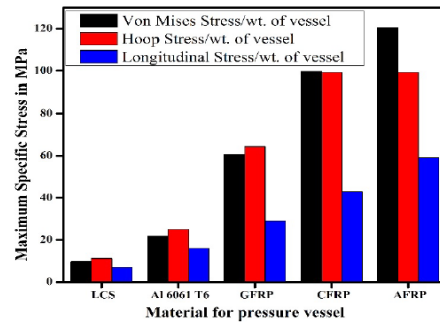
را برای کامپوزیت های متقارن و نامتقارن دارد و مقدار آن در ابتدا با افزایش دما افزایش یافته، سپس کاهش می یابد. فشار تخریب در دماهای بالا و به دلیل تنش های گرمایی و کاهش مقاومت های مکانیکی کاهش می یابد. همچنین فشار تخریب در زاویه های جهت گیری ۴۵، ۵۵ و ۶۰ درجه نیز در دمای پایین ۲ °C، به دلیل تنش های حرارتی و تغییر در مقاومت مواد کاهش می یابد.

آلام و همکاران [۱۲] نیز بهینه سازی طراحی مخزن کامپوزیتی تحت فشار نوع ۴ را با استفاده از روش المان محدود با استفاده از نرم افزار ABAQUS انجام دادند و تأثیر زوایای الیاف پیچی قطبی و حلقوی و ترتیب چیدمان لایه ها را بر فشار تخریب مخزن بررسی کردند (شکل ۷). همان طور که مشاهده می شود با افزایش زاویه حلقوی، فشار تخریب افزایش می یابد. زیرا با افزایش زاویه حلقوی، مقاومت در برابر تنش مخزن در جهت محوری افزایش یافته که منجر به افزایش فشار تخریب مخزن می شود.

در رابطه با زاویه قطبی نیز، افزایش آن از ۱۳ تا ۱۹ درجه در زاویه حلقوی ثابت (۸۸/۵ درجه) منجر به افزایش فشار تخریب مخزن می شود. به طور کلی، بار طولی توسط لایه های



شکل ۶ تغییرات فشار تخریب مخزن با دما [۱۱].



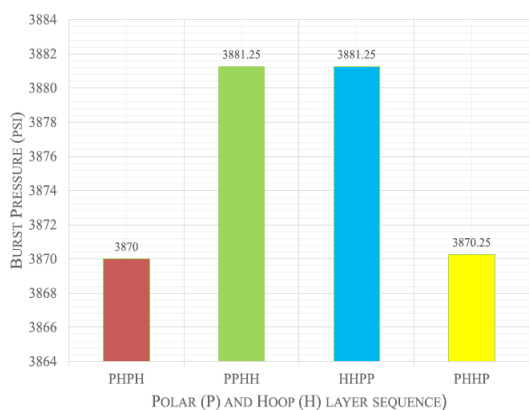
شکل ۴ مقایسه عملکرد مخازن مختلف [۱۰].

به دلیل وجود بیش تر الگوی الیاف پیچی حلقوی است که در برابر تنش های ایجاد شده در جهات دیگر مخزن مقاومت نمی کند.

شکل ۴ مخازن کامپوزیتی تحت فشار را با مخازن تحت فشار فلزی بر اساس معیارهای مختلف مقایسه می کند. همان طور که مشاهده می شود، بر اساس معیار حداکثر تنش خاص MSS: (Maximum Specific Stress)، مخازن CFRP، AFRP و GFRP در مقایسه مخازن فلزی فولاد LCS و آلومینیومی Al 6061 T6 عملکرد بهتری دارند. همچنین در مقایسه مخازن کامپوزیتی، مخزن AFRP بالاترین خواص و به دنبال آن مخازن Al 6061 T6، GFRP، CFRP و LCS قرار دارند. در نتیجه پارامترهای بهینه برای ساخت مخزن تحت فشار عبارتند از زاویه الیاف پیچی  $\pm 55^\circ$ ، کسر حجم الیاف ۰/۵۵ و الگوی الیاف پیچی  $((\pm 0_2^\circ)/90_2^\circ/(\pm 0_2^\circ))$ . اندر و سایمان [۱۱] نیز به بررسی زاویه بهینه در حالت متقارن و نامتقارن در طراحی بخش کامپوزیتی مخزن بر اساس رزین اپوکسی و الیاف شیشه پرداختند و آن را به صورت تجربی مورد آزمایش قرار دادند. در این مخازن، الیاف پیچی تحت زوایای  $[-45^\circ/45^\circ]$ ،  $S$ ،  $[55^\circ/-55^\circ]$ ،  $S$ ،  $[75^\circ/-75^\circ]$ ،  $S$ ،  $[60^\circ/-60^\circ]$  و  $S$ ،  $[-88^\circ/88^\circ]$  در دو حالت متقارن و نامتقارن انجام شد و فشار تخریب مخازن تحت فشار داخلی متناوب و با تغییر شرایط محیطی از نظر دما و زاویه بررسی شد. شکل ۵ تأثیر زاویه الیاف پیچی بر روی فشار تخریب را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، فشار تخریب برای زاویه جهت گیری ۵۵° بیش ترین مقدار را دارد و به عنوان زاویه بهینه در مخازن تحت فشار ترکیبی به دست می آید. همچنین در شکل ۵ مشاهده می شود که فشار تخریب برای حالت نامتقارن کمی بیش تر از حالت متقارن است.

تأثیر دما بر فشار تخریب مخازن تحت فشار برای زوایای جهت گیری مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل دیده می شود، زاویه ۵۵°، بالاترین فشار تخریب





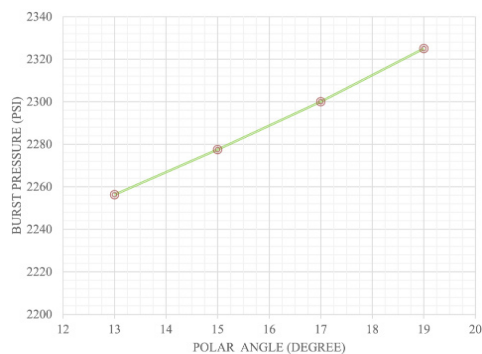
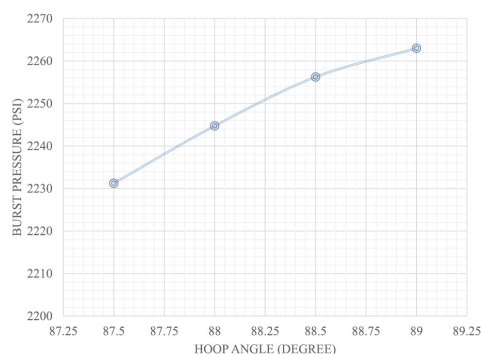
شکل ۸ تأثیر توالی لایه‌های کامپوزیت بر فشار تخریب مخزن [۱۲].

استفاده از سوخت‌های گازی را برای کاربردهای حمل و نقل و خودرو افزایش دهد.

تأثیر نوع الیاف نیز توسط گروه‌های مختلفی بررسی شده است. کانگال و همکاران [۱۴] مخازن کامپوزیتی نوع ۳ را با استفاده از الیاف شیشه و کربن بر روی آستری از جنس استیل 34CrMo4 تحت الگوی کامپوزیتی  $3[\pm 11^\circ/90^\circ_2]$  ساختند و خواص مکانیکی آستر فلزی، مخزن با لایه الیاف شیشه (GF(glass based COPVs)) و مخزن با لایه الیاف ترکیبی کربن/شیشه (hybrid) COPVs (glass/carbon based) را بررسی کردند. متوسط فشار تخریب آستر فولادی 657 bar اندازه‌گیری شد. مخزن با لایه الیاف شیشه (GF(glass based) COPVs)، فشار تخریب متوسط 899 bar را نشان داد که تقریباً مشابه با مخزن هیبریدی کربن/شیشه (hybrid) COPVs است (متوسط فشار تخریب 905 bar). نتایج فشار تخریب مخازن در جدول ۲ ارائه شده است. حالت تخریب کلیه مخازن تحت فشار آزمایش شده نیز در

جدول ۱ تأثیر تعداد لایه‌ها بر فشار تخریب مخزن کامپوزیتی [۱۳].

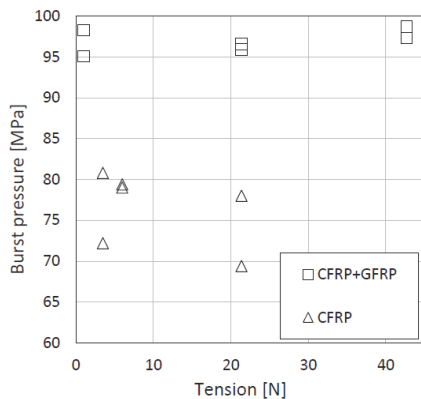
تعداد لایه‌ها	فشار تخریب (MPa)	تعداد لایه‌ها	فشار تخریب (Mpa)
۲۲	۶۲/۱۸	۳۲	۱۰۷/۳۵
۲۴	۷۰/۶۱	۳۴	۱۱۸/۴۳
۲۶	۷۹/۳۱	۳۶	۱۱۹/۳۱
۲۸	۹۴/۵۶	۳۸	۱۲۸/۹۲
۳۰	۹۴/۷۶	۴۰	۱۳۶/۹۰



شکل ۷ تأثیر (الف) زاویه الیاف پیچی حلقوی (ب) قطبی بر فشار تخریب مخزن [۱۲].

قطبی تحمل می‌شود و ضخامت لایه‌های قطبی مخزن با عکس کسینوس زاویه قطبی متناسب است. با افزایش زاویه قطبی، مقدار کسینوس کاهش می‌یابد و ضخامت مخزن افزایش یافته که منجر به افزایش فشار تخریب می‌شود. در رابطه با ترتیب لایه‌ها نیز مطابق با شکل ۸ مشاهده می‌شود که توالی PPHH (P: Polar, H: Hoop) و HHPP بالاتری فشار تخریب را دارند.

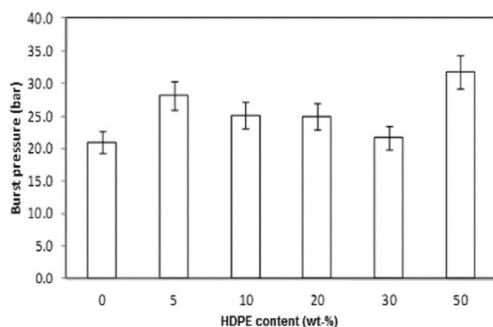
شارما و همکاران [۱۳] مدلی را برای بهینه کردن تعداد لایه‌ها به منظور دستیابی به فشار تخریب مشخص در مخازن کامپوزیتی با هدف دستیابی به وزن پایین مخزن ارائه دادند. مقادیر فشار تخریب برای مخازن با آستری از جنس نایلون و کامپوزیت اپوکسی/کربن در جدول ۱ نشان داده شده است. مدل برای ۴۰ لایه طراحی شده و برای دستیابی به حداقل وزن مخزن با فشار تخریب 70 MPa بهینه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با اعمال کامپوزیت 24 لایه امکان دستیابی به فشار تخریب 70/61 MPa فراهم می‌شود. از این مدل می‌توان برای بهینه‌سازی تعداد لایه‌های کامپوزیت نوع ۳ و ۴ به منظور کاهش وزن استفاده کرد. در مورد مخزن نامبرده، وزن تخمینی 23 kg حاصل شد که توسط نتایج تجربی نیز تأیید شده است. کاهش وزن می‌تواند عملکرد مخزن تحت فشار را بهبود داده، امکان



شکل ۱۰ فشار تخریب مخزن نوع ۳ بر حسب کشش در حضور و غیاب لایه حاوی الیاف شیشه [۱۵].

آستری پلیمری در مخازن نوع ۴ ممکن است از آمیزه پلیمرها ساخته شود. استفاده از مخلوط‌های پلیمری، به‌عنوان مثال مخلوط فیزیکی دو پلی اتیلن با هدف بهبود عملکرد هموپلیمرها در مورد فرایندپذیری و خواص، مقاومت خوب در برابر فشار هیدرواستاتیک و نفوذپذیری کم، (که در مورد آسترهای مخازن تحت فشار CNG مهم است) قابل دستیابی است.

نتو و همکاران [۹] مخازن نوع ۴ را با استفاده از آمیزه پلی اتیلن خطی با چگالی کم (LLDPE) و پلی اتیلن با چگالی بالا (HDPE) با هدف کاربرد در آستر مخازن کامپوزیتی تحت فشار تولید کردند و تأثیر ترکیب درصد مخلوط LLDPE/HDPE و پارامترهای فرایند (چرخه دما/زمان و سرعت چرخش) را بر قابلیت اختلاط آمیزه و خصوصیات نهایی آستر، از جمله تراکم و رفتار بلورینگی آستر پلاستیکی مخازن بررسی کردند. شکل ۱۱ تأثیر درصد HDPE را بر فشار تخریب نمونه‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه‌های LH05 (آمیزه حاوی ۵ درصد وزنی HDPE) و LH50 (آمیزه حاوی ۵۰ درصد وزنی

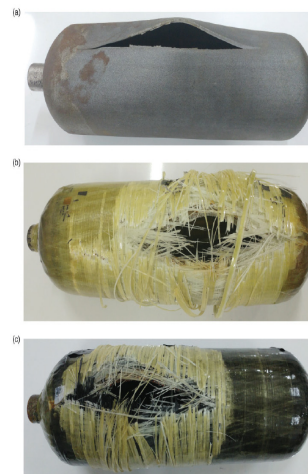


شکل ۱۱ تأثیر درصد HDPE بر فشار تخریب مخزن [۹].

جدول ۲ فشار تخریب مخازن با لایه الیاف مختلف [۱۴].

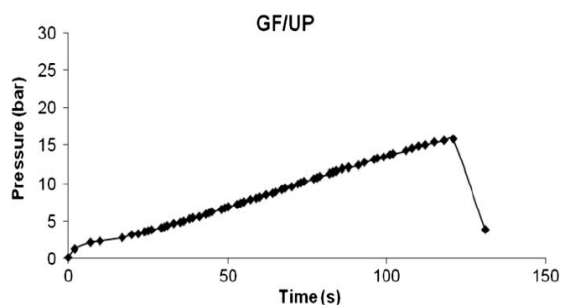
فشار تخریب (bar)		نمونه
نمونه ۲	نمونه ۱	
۶۹۲	۶۲۲	آستر فلزی
۸۷۹	۹۱۹	GF (glass fiber based) COPV
۸۸۷	۹۲۲	(glass/carbon based) COPVs hybrid

شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پارگی نهایی در قسمت استوانه‌ای رخ داده و حالت انفجار ایمن حاصل شده است. اندازه‌گیری‌های صوتی انجام شده در حین آزمایش هیدرواستاتیک نشان داد که ترک خوردگی، ابتدا در قطعات کامپوزیت ایجاد شده است. شکستگی الیاف که عمدتاً در لایه‌های قسمت حلقوی رخ داده است، احتمالاً به دلیل کرنش‌های بزرگ‌تر ایجاد شده در جهت حلقوی است و در نهایت به محض آن‌که شکست در لایه کامپوزیت تقویت‌کننده به شکست ماکرو رسیده است، پارگی نهایی در آستر رخ داده است. هارادا و همکاران [۱۵] نیز تأثیر نوع الیاف را بر فشار تخریب در مخازن نوع ۳ با آستر آلومینیومی و لایه‌های الیاف کربن و شیشه بررسی کردند (شکل ۱۰). همان‌طور که مشاهده می‌شود، فشار تخریب برای مخازن بدون لایه‌های الیاف شیشه (CFRP) در مقایسه با مخازنی که هر دو الیاف شیشه و کربن را دارند، از مقادیر کم‌تری برخوردار است. این امر نشان می‌دهد حضور هم‌زمان هر دو الیاف، تأثیر قابل توجهی بر خواص مخزن نهایی دارد.



شکل ۹ تخریب لایه آستر و لایه کامپوزیت مخزن [۱۴].





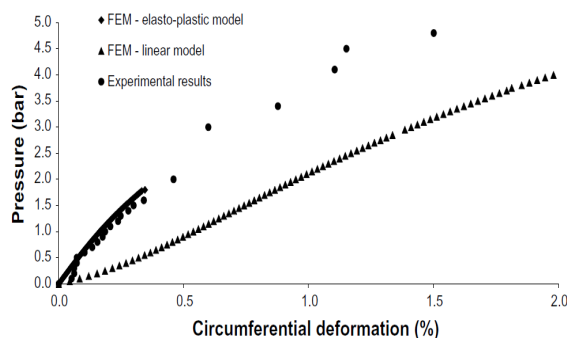
شکل ۱۳ نمودار فشار تخریب بر حسب زمان در مخزن کامپوزیتی تحت فشار [۱۶].

به طور کامل برآورده کرده است. همچنین بررسی نتایج تجربی و نظری نشان می‌دهد که پیش‌بینی فشار تخریب ۱۹ bar مطابق با نتیجه واقعی به دست آمده است و مدل ارائه شده می‌تواند به عنوان مبنایی برای پیش‌بینی فشار تخریب در چنین مخازنی استفاده شود.

جمع‌بندی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که عوامل مختلفی مانند نوع الیاف، زاویه الیاف پیچی، الگو، توالی و تعداد لایه‌های کامپوزیت به کار رفته، جنس آستر و دما از موارد مهم و موثر بر خواص نهایی مخزن تولید شده هستند که باید در طراحی مخازن کامپوزیتی مورد توجه قرار گیرند.

## ۶ نتیجه‌گیری

یکی از الزامات مهم در طراحی مخازن تحت فشار به خصوص در صنایع خودروسازی، کاهش نسبت جرم به حجم است. در حالی که مخازن تولید شده سنتی، مخازن فلزی فولادی با وزن بالا بودند، به مرور زمان مخازن کامپوزیتی با وزن پایین برای بهبود عملکرد مخزن طراحی شدند. در این مقاله، مروری بر این مخازن و انواع آن‌ها انجام شده و روش‌های ساخت با تأکید بر مخازن نوع ۳ و ۴ بیان شد. بررسی مطالعات انجام شده در رابطه با مخازن کامپوزیتی نشان داد که نوع الیاف، زاویه الیاف پیچی، الگو، توالی و تعداد لایه‌های کامپوزیت به کار رفته، جنس آستر و دما از موارد مهم و موثر بر خواص نهایی مخزن تولید شده هستند که باید در طراحی مخازن کامپوزیتی به منظور دستیابی به شرایط بهینه مورد توجه قرار گیرند.



شکل ۱۲ فشار تخریب بر حسب درصد جابه‌جایی در مخزن کامپوزیتی [۱۶].

(HDPE) بالاترین سطح فشار تخریب را دارند. نمونه LH50، با وجود برخورداری از بالاترین فشار تخریب هیدرواستاتیک، به دلیل حضور مقدار حفره بیش‌تر در سطوح داخلی و خارجی، قابلیت اطمینان استفاده در مخازن را فراهم نمی‌کند. بنابراین، بهترین عملکرد کلی برای ترکیب LH05 برای کاربرد در مخازن تحت فشار پیشنهاد می‌شود.

ولوسا و همکاران [۱۶] نسل جدیدی از مخازن کامپوزیتی تحت فشار را برای کاربردهای تجاری در بازار مورد مطالعه قرار دادند. به طوری که این مخازن از آستر پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE) و لایه کامپوزیتی رزین پلی‌استر غیراشباع تقویت شده با الیاف شیشه ساخته شدند. این گروه دو مدل خطی و الاستو-پلاستیک را برای این منظور ارائه داد، فشار تخریب را در این مخازن پیش‌بینی کردند. شکل ۱۲ نتایج پیش‌بینی دو مدل مختلف مواد خطی و الاستیک-پلاستیکی را برای تغییر شکل‌های محیطی آستر نشان می‌دهد. مقایسه نتایج تجربی و نظری نشان می‌دهد که مدل الاستوپلاستیک برای آستر HDPE نتایج کاملاً مطابق با داده‌های واقعی حاصل می‌کند و می‌تواند به عنوان معیاری از پیش‌بینی رفتار آستر باشد. شکل ۱۳ منحنی‌های فشار تخریب بر حسب زمان را برای نمونه مخزن کامپوزیتی تولیدی از آستر HDPE و لایه کامپوزیتی پلی‌استر غیر اشباع/الیاف شیشه مطابق با استاندارد EN ۱۲۲۴۵ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ترکیب‌گی در مخزن در فشارهای تقریباً ۱۸ بار رخ داده است. این نتایج نشان می‌دهد که مخزن ساخته شده الزامات استاندارد EN ۱۳۹۲۳ اروپا را برای فشار کاری ۶ bar

## مراجع

1. Khan M.I., Yasmin T., Shakoor A., Technical Overview of Compressed Natural Gas) CNG (As a Transportation Fuel, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 785-797, **2015**.
2. Fowler C.P., Orifici A.C., Wang C.H., A Review of Toroidal Composite Pressure Vessel Optimization and Damage Tolerant Design for High Pressure Gaseous Fuel Storage, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 22067-22089, **2016**.
3. Afkar, A., Kamari, M., Reliability Techniques to Reduce the Risk of Failure in CNG Composite Pressure Vessel, *Revisia QUID*, Special Issue, 1657-1665, **2017**.
4. Chauhan G.S., Awaṣṡhi A., Design and Analysis of High Pressure Composite Vessels, *International Journal of Latest Engineering and Management Research*, 3, 96-102, **2018**.
5. Stickel J.M., Nagarajan M., Glass Fiber-Reinforced Composites: From Formulation to Application, *International Journal of Applied Glass Science*, 3, 122-136, **2012**.
6. Ravi M., Muralidharan A., Arun S., Composite Gas Cylinders for Automotive Vehicles - Current Status of Adoption of Technology and Way Forward, *Symposium on International Automotive Technology*, India, **2013**.
7. Dahl E., Becker J.S., Mittelṡtedt C., Schürmann H., A New Concept for A Modular Composite Pressure Vessel Design, *Composites Part A*, 124, 105475, **2019**.
8. Barthelemy H., Weber M., Barbier F., Hydrogen Storage: Recent Improvements and Industrial Perspectives, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 7254-7262, **2017**.
9. Neto E.S.B., Coelho L.A.F, Forte M.M.C., Amico S.C., Ferreira C.A., Processing of a LLDPE/HDPE Pressure Vessel Liner by Roto molding, *Materials Research*, 17, 236-241, **2014**.
10. Biradar S., Sharnappa J., FE Analysis of FRP Pressure Vessel, *Key Engineering Materials*, 801, 77-82, **2019**.
11. Onder A., Sayman O., Dogan T., Tarakcioglu N., Burst Failure Load of Composite Pressure Vessels, *Composite Structures*, 89, 159-166, **2009**.
12. Alam S., Yandek G.R., Lee R.C., Mabry J.M., Design and Development of A Filament Wound Composite Overwrapped Pressure Vessel, *Composites Part C : Open Access*, 100045, 2, **2020**.
13. Sharma P., Bera T., Semwal K., Badhe R.M., Sharma A., Ramakumar S.S.V, Neogi S., Theoretical Analysis of Design of Filament Wound Type 3 Composite Cylinder for the Storage of Compressed Hydrogen Gas, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 25386-25397, **2020**.
14. Kangal S., Kartav O., Tanog M., Aktas E., Artem H.S., Investigation of Interlayer Hybridization Effect on Burst Pressure Performance of Composite Overwrapped Pressure Vessels with Load-Sharing Metallic Liner, *Journal of Composite Materials*, 54, 961-980, **2020**.
15. Harada S., Arai Y., Araki W., Iijima T., Kurosawa A., Ohbuchi T., Sasaki N., A Simplified Method for Predicting Burst Pressure of Type III Filament-Wound CFRP Composite Vessels Considering the Inhomogeneity of Fiber Packing, *Composite Structures*, 190, 79-90, **2018**.
16. Velosa J.C., Nunes J.P., Antunes P.J., Silva J.F., Marques A.T., Development of a New Generation of Filament Wound Composite Pressure Cylinders, *Composites Science and Technology*, 69, 1348-1353, **2009**.