بسم الله الرحمن الرحیم

پیشگفتار

با توجه به فرصت‌های موجود جهت کاهش روند رشد بالای مصرف فرآورده‌های نفتی در بخش حمل و نقل و افزایش کارایی مصرف سوخت در بخش مذکور و نیز ملاحظات زیست‌محیطی، سازمان بهینه‌سازی مصرف سوخت کشور از بدو تأسیس، طرح CNGسوز کردن خودروهای کشور را در دستور کار قرار داده‌است.

از آنجاکه طرح تبدیل سوخت خودروها به گاز طبیعی یک طرح فراسازمانی و ملی می‌باشد، ضروری است تا همزمان با انجام امور اجرایی و ستادی مربوط به این طرح، سطح دانش و اطلاعات کارشناسان و محققین در این بخش، با آخرین یافته‌های جهانی یکسان گردد و فرهنگ‌سازی مربوط به آن در سطح جامعه و دانشگاه فراگیر شود.

همزمان با برگزاری اولین همایش سراسری سوخت جایگزین (CNG) و خودروهای گازسوز به‌منظور ارتقاء سطح دانش عمومی در صنعت CNG مجموعه‌ای در ۵ جلد تحت عناوین:

۱. آلودگی
۲. ایستگاه‌های سوخت‌گیری
۳. کیت‌های تبدیل
۴. مخازن سوخت
۵. موتورهای گازسوز

تهیه شده تا علاقه‌مندان و پژوهشگران گرامی با کلیات مسائل مربوط به صنعت CNG آشنا گردند. در نگارش این مجموعه‌ها سعی شده که در هر مجموعه، مطالب به‌گونه‌ای بیان شوند تا خواننده پس از مطالعه آن‌ها، به یک دیدگاه کلی از وضعیت موجود رسیده و با معایب و مزایای خودروهای CNGسوز آشنا گردد.

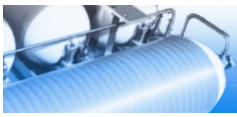
همچنین سعی شده تا از پرداختن به مطالب، به‌صورت صرفاً تخصصی خودداری شود و بدین ترتیب مخاطبین بیشتری بتوانند از مجموعه حاضر استفاده نمایند.

امید است مجموعه حاضر بتواند قدمی مثبت در جهت بالا بردن سطح اطلاعات و دانش فنی کارشناسان و محققین گرامی جهت اجرای موفقیت‌آمیز طرح ملی تبدیل سوخت خودروها به گاز طبیعی باشد.

وحید اصفهانیان

رئیس موسسه عالی پژوهشی خودرو، سوخت و محیط زیست

و دبیر علمی همایش



فهرست مطالب

۱- مقدمه ۱
۲- عملکرد و شرایط مخازن CNG ۵
۳- تعیین مخزن با توجه به نوع خودرو ۶
۴- انواع مخازن CNG ۱۰
۴-۱- مخازن CNG-I ۱۰
۴-۲- مخازن CNG-II ۱۱
۴-۳- مخازن CNG-III ۱۳
۴-۴- مخازن CNG-IV ۱۴
۴-۴-۱- اجزای مخزن CNG-IV ۱۵
۵- مقایسهٔ انواع مخازن ۱۸
۶- فناوری تولید مخازن گاز طبیعی فشرده ۱۹
۶-۱- تولید مخازن نوع ۱ ..... ۱۹
۶-۱-۱- تولید مخزن از مادهٔ اولیهٔ ورق ۲۰
۶-۱-۲- تولید مخزن از مادهٔ اولیهٔ لوله ۲۲
۶-۱-۳- تولید مخزن از مادهٔ اولیهٔ شمشال ۲۳
۶-۲- تولید مخازن نوع ۲ ..... ۲۳
۶-۲-۱- الیاف پیچی ۲۴
۶-۳- تولید مخازن نوع ۳ ..... ۲۵
۶-۳-۱- ساخت کامپوزیت‌های پیشرفته ۲۵
۶-۴- تولید مخازن نوع ۴ ..... ۲۷
۷- طراحی مخازن ۲۹
۷-۱- الزامات طراحی ۲۹
۷-۲- محدودیت‌های طراحی ۲۹
۷-۳- اصول حاکم برای طراحی مخازن CNG ۳۰
۷-۴- مراحل انجام طراحی ۳۱
۷-۵- مراحل محاسبه قیمت مخزن ۳۱
۸- استانداردهای مخازن ۳۲
۸-۱- استاندارد ISO ۳۴

۸-۲- تعدادی از استانداردهای مخازن CNG ۳۵
۸-۲-۱- استاندارد ISO/FDIS/11439 (CNG4) ۳۵
۸-۲-۲- استانداردهای رایج در ایالات متحده ۳۷
۸-۲-۳- استانداردهای ملی ایران ۴۰
۹- آزمون‌های مخازن CNG ۴۲
۹-۱- آزمون‌های کیفی حین تولید ۴۲
۹-۱-۱- بازرسی اولتراسونیک ۴۳
۹-۱-۲- آزمون سختی‌سنجی ۴۳
۹-۱-۳- آزمون تعیین حجم ۴۴
۹-۱-۴- کنترل‌های لازم برای مخازن کامپوزیتی ۴۴
۹-۲- آزمون‌های تأیید ایمنی مخازن ۴۴
۱۰- بازرسی ۵۱
۱۰-۱- نحوهٔ انجام بازرسی ۵۲
۱۰-۲- ویژگی‌های بازرس ۵۷
۱۱- مکانیزم‌های آسیب ۵۷
۱۱-۱- آسیب‌های معمول در مخازن ذخیرهٔ گاز طبیعی ۵۹
۱۱-۱-۱- به‌وجود آمدن آسیب درهنگام شکل‌دهی آستر ۵۹
۱۱-۱-۲- آسیب درهنگام ایجاد پوشش کامپوزیت ۵۹
۱۲- اطلاعات مربوط به علامت‌گذاری مخزن ۶۱
۱۳- فناوری‌های جدید در مخازن CNG ۶۲
۱۳-۱- سیستم ذخیره‌سازی ISS ۶۲
۱۳-۲- مخازن تطابق‌پذیر ۶۴
۱۳-۳- مخازن با قطر بزرگتر ۶۶
۱۳-۴- طراحی نوع خاصی از مخزن CNG ساخته‌شده از جنس آلومینیوم و پلاستیک تقویت‌شده ۶۷
مراجع ۶۹
واژه‌نامه فارسی- انگلیسی ۷۳

۱ مقدمه

مشکلات ناشی از ذخیره‌سازی سوخت گاز، به‌عنوان یک مانع بزرگ در توسعهٔ سریع خودروهای گازسوز جلوه کرده‌است. در حال حاضر سه مبنا برای ذخیره‌سازی سوخت‌های گازی که جزء اصلی آن‌ها متان است، وجود دارد:

۱. گاز طبیعی فشرده[۱] (CNG)

۲. گاز طبیعی مایع‌شده[۲] (LNG)

۳. گاز طبیعی جذب‌شده[۳] (ANG)

امروزه استفاده از گاز طبیعی فشرده بیشترین کاربرد را از بین سه روش فوق دارد. مخازن ذخیرهٔ گاز تحت فشار بالا، که در حال حاضر برای خودروهای گازسوز کاربرد دارند، نسبت به آنچه که ده سال پیش مورد استفاده واقع می‌شد، به‌طرز قابل‌توجهی تکامل یافته‌اند. در مخازن فعلی، نسبت وزن بر واحد حجم گاز ذخیره‌شده در مقایسه با مخازن اولیه، به بیش از نصف کاهش یافته و مخازن در اندازه‌ها و شکل‌های متفاوت تولید شده‌اند. البته توسعه و پیشرفت در این راه با کاربرد استانداردهای جدیدISO[۴] با سرعت بیشتر قابل پیش‌بینی و انتظار است. این در حالی است که دیگر روش‌های ذخیره‌سازی گاز در مراحل اولیهٔ توسعهٔ خود هستند.

به‌کارگیری گاز طبیعی فشرده به‌عنوان سوخت وسائط نقلیه در مقیاس وسیع در دو دههٔ ۵۰ و ۶۰ میلادی در ایتالیا و روسیه آغاز شد. مخازن اولیه، مخازن فولادی بودند که با مشخصات صنعتی- ملی گوناگون ساخته می‌شدند تا این‌که در اواخر سال ۱۹۷۰ میلادی با

[1] - Compressed Natural Gas
[2] - Liquefied Natural Gas
[3] - Absorbed Natural Gas
[4] - International Organizations for Standardization

وضع مقررات جدید در ایتالیا، مخازن فولادی کم‌وزن به بازار عرضه شدند. در آمریکای شمالی نیز تبدیل سوخت وسائط نقلیه به گاز طبیعی در مقیاس وسیعی، از سال ۱۹۸۰ میلادی به‌بعد آغاز گردید. مخازن سبک‌وزن ساخته‌شده از آستر فلزی پیچیده‌شده با الیاف شیشه‌ای که برای کاربردهای فضایی توسعه یافته بودند، در سال ۱۹۷۷ میلادی به بازارهای صنعتی وارد شدند. در سال ۱۹۸۲ میلادی مخازنی که با آستر آلومینیومی با پیچش محیطی الیاف شیشه ساخته شده‌بودند در صنعت CNG مورد استفاده قرار گرفتند. سازندگان مخازن فولادی این روند را تا طرح‌های سبک‌وزن‌تر برای CNG با تولید کردن آسترهای فولادی پیچیده‌شده با الیاف شیشه‌ای که در سال ۱۹۸۵ میلادی آغاز شده بود، دنبال کردند. برای این‌که وزن مخزن را برای کاربردهای CNG کاهش دهند، سازندگان بسیاری، طرح‌های کامپوزیتی کاملاً پیچیده‌ای را توسعه دادند و آسترهای فلزی یا پلاستیکی را برای مخزن محتوی گاز به‌کار بردند. در اواخر دهه ۸۰ میلادی کاربردهای عملی مخازن CNG با آسترهای پلاستیکی تقویت‌شده درسوئد، روسیه و فرانسه شروع شد. به‌دنبال توسعهٔ استانداردهای مخازن گاز طبیعی در آمریکای شمالی، طرح‌هایی با آسترهای نسبتاً نازک آلومینیوم یا آسترهای پلاستیکی تقویت‌شدهٔ کاملاً پیچیده‌شده با پوشش الیاف شیشه و الیاف کربن بعد از سال ۱۹۹۲ میلادی به بازار معرفی شدند. شکل ۱ نمونه‌هایی از این مخازن را نشان می‌دهد.

مشخصات عمدهٔ فناوری‌های ذخیره‌سازی سوخت گاز طبیعی در جدول ۱ خلاصه شده‌اند. برای مقایسه؛ بنزین، اتانول و متانول نیز در این جدول فهرست شده‌اند. مقایسهٔ فناوری‌های ذخیرهٔ گاز طبیعی و فناوری‌های ذخیرهٔ سوخت‌های مایع رایج، براساس ذخیره انرژی یکسان در هر سیستم سوخت بیان شده‌است.

شکل ۱: نمونه‌هایی از مخازن تولیدشده توسط سازندگان

مبنای مقایسه، یک مخزن ۴۵ لیتری بنزین است که اکثراً در خودروهای شخصی متوسط استفاده می‌شود. با فرض ذخیرهٔ گاز طبیعی برای ۳۲۰ کیلومتر و با مصرف بنزین ۱۱/۸ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر، سه مخزن ۵۰ لیتری گاز نیاز می‌باشد. همچنین در خودروهایی با مصرف بنزین ۸/۸ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر، دو مخزن ۵۰ لیتری گاز و در خودروهایی با مصرف بنزین ۷ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر، یک مخزن ۵۰ لیتری گاز لازم است. با افزایش نسبت تراکم خودروهای گازسوز، می‌توان تا ۱۵ درصد مصرف سوخت را کاهش داد که باعث کاهش وزن مخزن و هزینهٔ ذخیرهٔ گاز می‌گردد. افزایش نسبت تراکم موتور از افزایش حجم مخزن ذخیرهٔ گاز طبیعی فشرده اقتصادی‌تر است.

جدول ۱: مقایسهٔ روش‌های مختلف ذخیرهٔ سوخت در خودروها [۲۷].

فناوری ذخیره سوخت	حجم (lit)	وزن (kg)	انرژی (10^9 J)	هزینه ($)	پیمایش (km)
بنزین	۴۶/۹	۳۹/۵	۱/۴۹۳	۲۵	۵۳۴
اتانول	۷۱/۱	۶۳/۱	۱/۴۸۷	۴۰	۵۳۳
متانول	۹۵/۴	۸۴/۴	۱/۴۹۳	۵۰	۵۳۴
مخزن نوع ۲*	۱۴۹/۹	۱۵۰/۷	۱/۴۹۸	۱۵۴۵	۵۳۶
مخزن نوع ۳*	۱۵۲/۵	۱۳۳	۱/۵۱۴	۱۶۹۵	۵۴۲
مخزن نوع ۴*	۱۴۹/۹	۶۴/۹	۱/۴۹۳	۲۰۵۰	۵۳۴
گازطبیعی مایع	۶۸/۱	۷۱/۳	۱/۵۱۴	۱۸۷۵	۵۴۲
گازطبیعی جذب‌شده	۱۵۱/۴	۹۰/۸	۱/۴۷۷	در مرحلهٔ تحقیقاتی	۵۲۹

* حجم در مخازن گاز طبیعی به‌صورت حجم آبی (لیتر آب) سنجیده می‌شود.

مخازن CNG به‌دلیل ملاحظاتی همچون سهولت ساخت و استحکام، اغلب به‌شکل کروی یا استوانه‌ای ساخته می‌شوند. ساخت آستر فلزی مخازن به‌شکل مستطیلی (جعبه‌ای)، عایق‌کاری آن‌را مشکل می‌کند و همچنین از استحکام کمتری به‌علت جوشکاری در درزها برخوردار می‌باشد. در عوض مخازن استوانه‌ای براحتی قابل ساخت می‌باشند. در دو سر این مخازن، دو نیمکرهٔ عدسی‌شکل به روش‌های خاص شکل‌دهی ایجاد می‌گردند. بنابراین مخازن گاز طبیعی بدون درز و جوش هستند. بخش عمده‌ای از هزینهٔ ساخت مخازن استوانه‌ای را هزینهٔ همین قسمت‌های نیمکره‌ای تشکیل می‌دهد. مخازن کروی در مقایسه با مخازن

استوانه‌ای از لحاظ اندازه و فضایی که اشغال می‌کنند برای قرارگیری در صندوق عقب اتومبیل یا هر جای دیگری که برای مخزن درنظر گرفته شود، مناسب نمی‌باشند. در شکل ۲ نمونه‌ای از شکل عمومی مخازن، نشان داده شده‌است.

شکل ۲: شکل عمومی مخازن CNG

۲ عملکرد و شرایط مخازن CNG

شرایط طراحی و سرویس برای مخازن CNG، فشار ۲۰۰ bar در دمای ۱۵ °C است. بیشینهٔ فشار پرشدگی مخزن ۲۶۰ bar است که بیشینهٔ دمای مجاز را هم در مخزن ایجاد می‌کند، این حالت در هنگام پرشدن مخزن در سیستم‌های سریع رخ می‌دهد. کمترین دفعات پرشدن یک مخزن در طول عمر خود ۱۵۰۰۰ مرتبه و حداکثر عمر یک مخزن معمولاً ۲۰ سال است. قابلیت‌های تعمیر، سرویس‌دهی و بازرسی متناوب مخازن تحت فشار گاز طبیعی از دیگر موارد مهمی هستند که در طراحی و ساخت این مخازن باید توسط سازندگان آن‌ها درنظر گرفته

شوند. یکی از معایب گاز طبیعی به‌عنوان سوخت خودروها این است که در شرایط استاندارد، گاز است و درنتیجه چگالی کمی دارد. در دما و فشار استاندارد یک گالن (۲۳۱ in^3 یا ۰/۰۰۳۷۹ m^3) از گاز طبیعی حدود $۱/۴ \times ۱۰^{۵}$ ژول انرژی دارد که در مقایسه با $۱/۳ \times ۱۰^{۸}$ ژول انرژی یک گالن گازوئیل بسیار کم است. بنابراین انرژی حجمی آن (J/m^3) بسیار کم است و درنتیجه گاز طبیعی باید در فشار بالا به‌صورت فشرده ذخیره شود. برای ذخیره کردن گاز به‌صورت فشرده، گاز طبیعی فشرده در مخازن CNG در فشار ۳۰۰۰ psi ($۲/۰۷ \times ۱۰^{۷}$ Pa) ذخیره می‌شود. برای این منظور و کاربردهای مختلف در خودروهای مختلف این مخازن در قطرها و طول‌های متفاوتی ساخته می‌شوند.

در آمریکای شمالی، سیستم‌های سوخت CNG معمولاً برای فشار ۲۰/۷ MPa یا ۲۴/۸ MPa (۳۰۰۰ psi یا ۳۶۰۰ psi) طراحی شده‌اند. این فشار، فشار نامی سیستم در شرایط ۲۱ °C (۷۰ °F) می‌باشد. به هرحال دمای گاز در خودرو گسترهٔ وسیعی دارد (از ۴۰- °C تا بیشتر از ۵۷ °C (۴۰- °F تا ۱۳۵ °F)). بنابراین فشار گاز ممکن است تقریباً از ۱۵/۲ MPa در ۴۰- °C تا ۳۰/۳ MPa در ۵۷ °C (۲۲۰۰ psi در ۴۰- °F تا ۴۴۰۰ psi در ۱۳۵ °F) تغییر کند.

۳ تعیین مخزن با توجه به نوع خودرو

یکی از نکات مهم در طراحی خودروهای سبک گازسوز، طراحی، انتخاب و نصب صحیح یک مخزن می‌باشد. محدودیت‌های وزنی، قیمتی و فضای اشغال‌شده توسط این نوع مخازن در این خودروها اهمیت بسیار بالایی دارند. ذخیرهٔ گاز در مخازن کوچک، مشکلات فوق را تا حد

زیادی حل می‌کند ولی موجب می‌شود تا نیاز به سوخت‌گیری مجدد در خودرو بشدت بالا رود و عملکرد چنین خودرویی مناسب نیست. وقتی به محدودیت‌های سوخت‌گیری مجدد خودرو (سوخت‌گیری‌های پی‌درپی) نیز بیاندیشیم مسألهٔ طراحی یا انتخاب مناسب، از اهمیت بیشتری برخوردار می‌شود. در سیستم‌های دوسوخته یا خودروهایی که با دو نوع سوخت کار می‌کنند به‌علت وجود سوخت ثانویه در کنار گاز، این مسأله چندان بحرانی نیست و طراحی یا انتخاب، کمی ساده‌تر می‌شود زیرا امکان سوئیچ کردن بین سوخت گاز و سوخت مایع وجود دارد. به هر حال سوخت‌گیری‌های متوالی، زمانی که حجم مخزن ذخیرهٔ خودرو کوچک باشد، می‌تواند سبب استفادهٔ دائمی مصرف‌کننده از گازوئیل یا بنزین در چنین خودروهایی شود و این امر مطلوب نیست. برای رانندگان خودروهای شخصی، معمولاً انگیزهٔ اقتصادی برای جلوگیری از استفادهٔ بنزین یا گازوئیل وجود دارد، حال آن‌که در مورد رانندگان خودروهای دولتی و عمومی چنین نیست و آن‌ها ترجیح می‌دهند که از بنزین یا گازوئیل استفاده کنند. میزان انرژی ذخیره‌شده در مخازن با فشار بالای CNG، به ترکیب گاز بستگی خواهد داشت و استاندارد عمومی خاصی در این زمینه وجود ندارد. مقیاس مفیدی که برای محاسبهٔ تعداد مخازن می‌توان به‌کار برد، این است که هر لیتر مخزن، میزان ۱۸۰ گرم گاز طبیعی را نگهداری می‌کند. نکتهٔ مهم دیگر این است که دمای گاز ذخیره‌شده معمولاً درنظر گرفته نمی‌شود اما به‌طور متعارف باید $15\,^{\circ}C$ درنظر گرفته شود. درهنگام پرکردن مخزن، به‌دلیل بالا رفتن دمای گاز، حجم آن افزایش می‌یابد و درنتیجه، این امر سبب کاهش حجم مؤثر مخزن می‌شود. به‌طور میانگین خودرویی که موتور آن ۱/۵ لیتر حجم دارد با یک مخزن ذخیرهٔ ۶۰ لیتری حدود ۱۸۰ تا ۲۰۰ کیلومتر حرکت می‌کند. این مسأله در مورد خودروهای دوسوخته مناسب به‌نظر می‌رسد، مشروط بر این‌که اولاً توسعهٔ جایگاه‌های سوخت‌گیری مجدد بخوبی انجام گیرد تا از

این نظر مشکلی حاصل نگردد و ثانیاً اختلاف قیمت بین سوخت گازی و بنزین بنحوی باشد که راننده ترغیب شود از سوخت گاز استفاده کند. با افزایش تولید و تجربه‌های عملی خودروهای گازسوز، در دسترس بودن گسترهٔ وسیع‌تری از شکل و اندازهٔ مخازن، توازن اقتصادی بین محدودیت‌ها حاصل خواهد شد. به هر حال مسألهٔ حجم مخزن CNG و جانمایی آن یکی از جنبه‌های منفی سوخت‌های گازی و کاربرد آن در خودروها به‌شمار می‌آید.

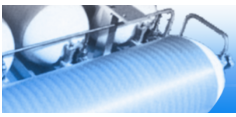
در برخی از خودروهای بزرگتر، امکان جانمایی مخزن در زیر سقف ماشین یا قسمت‌هایی که در آن‌جا فضای مرده وجود دارد، به‌وجود آمده‌است و درنتیجه استفاده از حجم‌های بزرگتر مخزن میسر گشته‌است ولی این مشکل همچنان بر سر راه خودروهای کوچک قرار دارد. به‌عنوان یک راه‌حل، می‌توان مخزن بنزین را کاملاً برداشته و توسط یک مخزن کوچک ذخیرهٔ بنزین جایگزین کرد به‌طوری‌که حداقل ظرفیت لازم برای رسیدن به جایگاه سوخت‌گیری را داشته و از طرفی فضای مورد نیاز برای نصب مخازن CNG مهیا شود. طراحی و ساخت مخازن فشاربالا با بهبود ساختار مواد مصرفی، با پیشرفت قاطعی همراه بوده‌است و در مدت پانزده سال، نسبت وزن بر واحد حجم مخازن از حدود ۱/۴ kg/lit تا نزدیک ۰/۳ kg/lit کاهش یافته‌است (توجه شود که حدود ده سال پیش، رسیدن به مقدار ۰/۴ در حالت نظری به‌عنوان کمترین حد ممکن درنظر گرفته می‌شد).

با توجه به هزینهٔ بالای مخازن گاز طبیعی و همچنین هزینهٔ استهلاک قطعات مختلف خودرو که ناشی از افزودن وزن مخازن روی خودرو و غیره می‌باشد، انتخاب صحیح مخازن تأثیر انکارناپذیری بر مطالعات اقتصادی و حاشیه اطمینان بازگشت سرمایه، خواهد داشت. با نگرش جامع به مسألهٔ جایگزینی سوخت‌های موجود خودروها با سوخت گاز طبیعی فشرده، انجام

بررسی در خصوص تأثیر افزودن وزن مخازن بر پارامترهای مختلف عملکردی و سازه‌ای بررسی خاص خود را طلب می‌نماید. این بررسی به‌دلایل زیر لازم می‌باشد:

- وزن مخزن با قیمت آن نسبت عکس دارد.
- عمده‌ترین رقم سرمایه‌گذاری در پروژهٔ جایگزینی، مربوط به مخازن می‌باشد.
- موضوع مهم دیگر، میزان تحمیل اضافه‌وزن ناشی از هر یک از انواع مخازن و اثر آن در تغییر مرکز ثقل و سیستم تعلیق خودرو، بدون درنظر گرفتن قیمت آن است. با توجه به محدودیت‌های وزنی و نیز حجم آبی مخازن مورد نیاز برای پیمایش‌های مختلف و همچنین محدودیت حجمی صندوق عقب خودرو، نوع مخزن مورد استفاده مشخص می‌شود.
- از دیگر پارامترهای مهم در انتخاب مخزن مناسب، انتخاب با توجه به حداقل پیمایش با یک‌بار سوخت‌گیری است. این مسأله در هیچ یک از استانداردهای موجود، مطرح نگردیده‌است و صرفاً کارخانه‌های خودروساز با توجه به امکانات موجود از نظر جانمایی مخزن، حداکثر پیمایش قابل دستیابی و حداقل کردن تعداد مخازن، به‌جهت صرفه اقتصادی، به آن می‌پردازند.
- با بررسی خودروهای سواری در حال حرکت و با توجه به استانداردها و مقررات نصب، در حال حاضر، نصب مخازن صرفاً در صندوق عقب یا پشت صندلی عقب مقدور است.

به‌جهت اهمیت زیاد قیمت و وزن مخازن CNG، باید مقایسهٔ قیمت و وزن نیز انجام شود. اگر خودرو دوسوخته باشد وزن بنزین، گاز و مخزن از اهمیت زیادی برخوردار می‌گردد و می‌بایست از مخازن سبک کامپوزیتی استفاده کرد تا نسبت وزن به قدرت، کاهش یابد. با درنظر گرفتن وزن و ظرفیت در مخازن گاز طبیعی فشرده، هزینهٔ مواد و تجهیزات و هزینه‌های



تولید، می‌توان هزینهٔ تولید مخازن را با هم مقایسه کرد. در مقایسهٔ فناوری‌های ذخیره گاز طبیعی فشرده، استفاده از مخازن آلومینیومی در مقایسه با مخازن فولادی باعث کاهش وزن خودرو می‌شود.

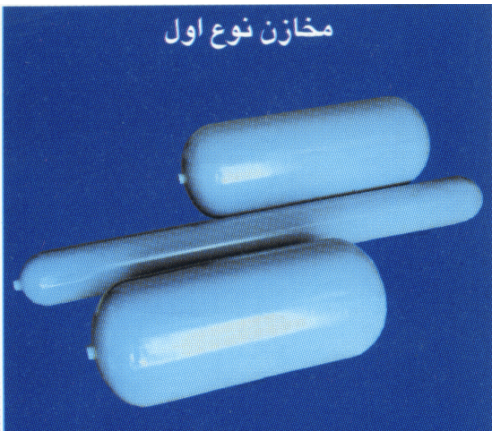
۴ انواع مخازن CNG

مخازن CNG به چهار دستهٔ کلی تقسیم می‌شوند. در ادامه به توضیح انواع مختلف مخازن CNG پرداخته می‌شود.

۴-۱ مخازن CNG-I

نمونه‌هایی از مخازن CNG-I در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. این مخازن بدون درز و از جنس فولاد یا آلومینیوم می‌باشند. گرچه نوع آلیاژ مورد استفاده و همچنین تنش‌های طراحی این‌گونه مخازن در استاندارد مشخص نگردیده‌است ولیکن این‌گونه مخازن فولادی یا آلومینیومی باید آزمون‌های کارایی را بگذرانند. آزمون‌ها به‌دلیل اطمینان از چقرمگی[۵] و مقاومت در برابر تنش، خوردگی و ترک در جنس به‌کار رفته، صورت می‌گیرند. همچنین آزمون‌های سختی[۶] و فشار هیدرواستاتیک جهت اطمینان از استحکام مخزن نیز انجام می‌گیرند.

[5] - Toughness
[6] - Hardness



شکل ۳: مخازن CNG-I [۱۹].

۲-۴ مخازن CNG-II

نمونه‌هایی از مخازن CNG-II در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. این نوع مخازن دارای یک لایهٔ آستری از جنس فولاد یا آلومینیوم بدون‌درز است و قسمت استوانه‌ای این آستری، توسط الیاف شیشه، آرامید، کربن یا مخلوطی از آن‌ها که آغشته به رزین است به‌صورت محیطی پیچیده شده‌است. ساختار کامپوزیتی این مخازن، این امکان را به‌وجود می‌آورد که بتوان از ضخامت قسمت فلزی کاست و درنتیجه مخزن سبک‌تری به‌دست آورد. این مخازن در جهت شعاعی (به جز دو قسمت ابتدایی و انتهایی) تقویت شده‌اند.

مبنای طراحی این نوع مخازن بر توانایی آستر فولادی یا آلومینیومی در تحمل فشار بالا می‌باشد. در مورد این نوع مخازن CNG این نکته شایان توجه است که فشار اضافی و دمای بالاتر باعث از بین رفتن کیفیت پوشش کامپوزیت نخواهد شد. این نوع مخازن از الیاف پیچی

پیوسته[۷] ساخته می‌شوند که برای ساخت آن‌ها از آسترهای فولادی یا آلومینیومی استفاده می‌گردد و به آن‌ها مخازن پیچش محیطی[۸] گفته می‌شود. این مخازن از سال ۱۹۸۰ میلادی ساخته می‌شوند و مبنای طراحی آن‌ها توانایی آسترهای فولادی در تحمل بیشینهٔ فشار پرشدن مخزن می‌باشد. این امر به طراحان اجازهٔ استفاده از آسترهایی با تحمل تنش بیشتر از حد معمول را می‌دهد.

شکل ۴: مخازن CNG-II [۱۹].

[7] - Continuous Filament Winding
[8] - Hoop Wrapped

۳-۴ مخازن CNG-III

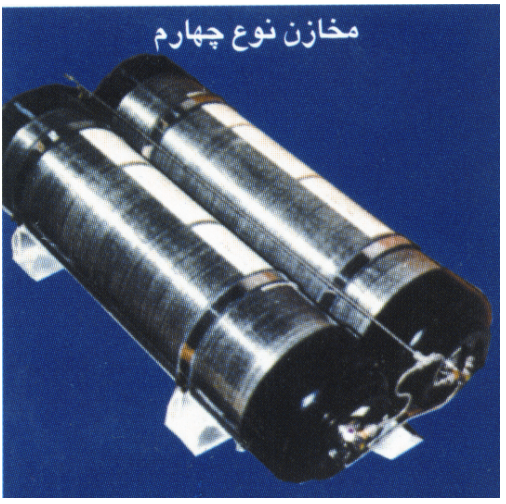
نمونه‌هایی از مخازن CNG-III در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. این مخازن دارای یک لایهٔ آستری از جنس فولاد یا آلومینیوم بدون‌درز بوده و تمام این لایهٔ داخلی توسط الیاف شیشه، آرامید، کربن یا مخلوطی از آن‌ها که آغشته به رزین است در راستای محیطی و محوری[۹] پیچیده شده و این ساختار کامپوزیتی که به مخزن داده می‌شود، این امکان را به‌وجود می‌آورد که بتوان از ضخامت قسمت فلزی کاست و درنتیجه مخزن سبک‌تری را نسبت به مخازن نوع اول و دوم به‌دست آورد. این مخازن با الیاف کامپوزیت در جهت محیطی و محوری تقویت شده‌اند. این‌گونه مخازن از اواسط دهه ۷۰ میلادی برای ذخیرهٔ گاز اکسیژن در مصارف پزشکی استفاده می‌شوند. تقویت این مخازن با الیاف کامپوزیت در دو جهت، قابلیت تحمل فشار را نسبت به مخازن نوع دوم، افزایش می‌دهد.

شکل ۵: مخازن CNG-III [۱۹].

[۹] - در متون انگلیسی از کلمهٔ Polar برای این منظور استفاده می‌شود. از آنجاکه این نوع پیچش از یک قطب مخزن به قطب دیگر آن انجام می‌گیرد در این‌جا از عبارت پیچش محوری استفاده می‌شود.

۴-۴ مخازن CNG-IV

این نوع مخازن دارای یک آستری از جنس پلیمر بدون درز هستند و تمام این لایهٔ داخلی توسط الیاف شیشه، آرامید، کربن یا مخلوطی از آن‌ها که آغشته به رزین است پیچیده شده و این ساختار تمام کامپوزیت از سبک‌ترین انواع مخازن CNG می‌باشد. این مخازن با الیاف کامپوزیت در جهات شعاعی و محوری تقویت شده‌اند. این‌گونه مخازن قابلیت تولید در ابعاد بزرگتر و با قطر بیشتر را دارند. مخازن نوع ۴ دارای کمترین وزن می‌باشند که حتی با سیستم سوخت بنزینی قابل مقایسه هستند. اشکال عمدهٔ این مخازن ایجاد نشتی به مرور زمان در محل اتصال نافی فلزی[۱۰] و آستر پلیمری می‌باشد. همچنین به‌علت عدم انتقال حرارت مناسب آستری پلاستیکی، حین سوخت‌گیری سریع در این مخازن افزایش دمای نسبتاً بیشتری ایجاد می‌شود. از جمله مزایای این نوع مخازن احتمال کم ترکیدگی مخزن در حوادث می‌باشد.



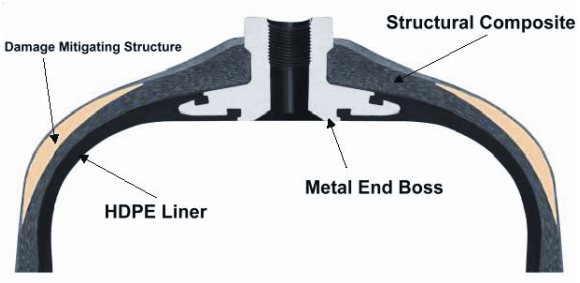
شکل ۶: مخازن CNG-IV [۱۹].

[10] - Metal End Boss

این مخازن بسیار شبیه مخازن نوع سوم هستند و تنها از لحاظ نوع و جنس آسترها تفاوت دارند. این نوع از مخازن برای کاربرد در خودروهای گازسوز بسیار مناسب هستند و پتانسیل طراحی و ساخت برای عمرهای طولانی را دارا می‌باشند. آزمون‌های خستگی انجام‌شده روی تعداد زیادی از این مخازن، عمر این مخازن را بیش از ۱۰۰۰۰۰ سیکل سوخت‌گیری نشان داده‌اند که در مقایسه با سایر مخازن بالاتر است. در شکل ۶ نمونه‌ای از این مخازن نشان داده شده‌است.

۱-۴-۴ اجزای مخزن CNG-IV

شکل ۷ نشانگر مقطعی کامل از یک مخزن CNG-IV است. این مخازن به‌طور کلی از ۵ جزء اصلی تشکیل می‌شوند.



شکل ۷: سطح برش‌خورده مخازن CNG-IV [۶].

۱. آستر

این قسمت معمولاً از مواد پلیمری، الاستومری یا پلی‌اورتان با چگالی بالا (HDPE) تولید می‌شود. مادهٔ HDPE تاکنون در ساخت اجزای سیستم سوخت اتومبیل‌های زیادی

استفاده شده‌است. این ماده در صنعت توزیع گاز طبیعی قدمتی ۲۵ ساله دارد. بعلاوه این ماده با استاندارد

Type III Cat 5, Class C ASTM 1248, Grade P34

بخوبی مطابقت دارد. خواص عمده و کلی این نوع آسترها به‌شرح زیر است:

الف- مقاومت خوب و نسبتاً بالایی در مقابل نشت گاز ایجاد می‌نمایند.

ب - با قطعهٔ نافی فلزی تداخل کرده و سازهٔ مناسبی جهت آب‌بندی ایجاد می‌کنند.

پ - سازهٔ اولیه و مناسبی جهت الیاف پیچی ایجاد می‌نمایند.

ت - به‌دلیل پایین بودن مدول الاستیسیته آن‌ها، براحتی نیروهای ناشی از فشار داخلی را به سازهٔ اصلی منتقل می‌کنند.

ث - این آسترها مقاومت بالایی در مقابل ترک‌های محیطی ناشی از تنش دارند.

ج - ارزان هستند و براحتی شکل می‌گیرند.

۲. نافی فلزی

دو وظیفهٔ اصلی این قطعه که از اجزای حساس و مهم یک مخزن CNG به‌شمار می‌آید، به‌شرح زیر است:

الف - زمینهٔ مناسب را جهت الیاف‌پیچی کامپوزیتی جهت ساخت مخازن مهیا می‌کند.

ب - وسیلهٔ ارتباط ورود و خروج گاز را بین مخزن و تأسیسات خارجی مخزن به‌عهده دارد.

به‌دلیل شکل فلنجی، الیاف‌پیچی روی آن بسهولت انجام گرفته و فرآیند با مشکل مواجه نخواهد شد. رزوه‌های روی نافی فلزی نقش تأسیساتی و ارتباطی بین تجهیزات خارجی و نافی را فراهم می‌نماید و براحتی می‌توان شیرآلات و اتصالات لازم جهت تغذیه و مصرف گاز را روی آن تعبیه کرد. درنهایت در قسمت پهن فلنجی شکل نافی شیارهایی ایجاد

می‌گردد که این شیارها وظیفهٔ اصلی جلوگیری از نشت گاز را فراهم می‌کنند و همچنین باعث استحکام بین آستر و نافی نیز می‌گردد. نافی‌هایی که تاکنون در مخازن CNG استفاده شده‌اند، دارای شکل‌های مختلف و متنوعی هستند. این قطعات معمولاً از آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ یا فولاد آلیاژی ساخته می‌شوند.

۳. قسمت کامپوزیتی مخزن

همان‌طور که در قسمت‌های قبلی توضیح داده شد، هر قسمتی از یک مخزن CNG وظیفهٔ خاصی را به‌عهده دارد. جزء کامپوزیتی مخزن که از یک کامپوزیت هیبرید با لایه‌های مختلف (کربن- شیشه- اپوکسی) تشکیل می‌شود توسط فرآیند الیاف پیچی تولید می‌گردد. انتخاب الیاف کربنی به‌دلیل نسبت بالای مقاومت به وزن، خواص خستگی عالی، عدم حساسیت به شرایط محیطی و قابلیت اطمینان آن، می‌باشد. درحالی‌که الیاف شیشه‌ای مقاومت اندکی دارد و هدف اصلی استفاده از این ماده کامپوزیتی، بهبود تحمل مخزن نسبت به صدمات و ضربه‌های احتمالی می‌باشد. در واقع وظیفهٔ اصلی قسمت سوم یک مخزن CNG تحمل فشار داخلی مخزن است.

۴. فوم‌های قالبی تزریق‌شده

بعد از اتمام ساخت بدنهٔ اصلی مخزن، فوم‌های قالبی تزریق‌شده روی قسمت گنبدی‌شکل مخزن نصب می‌گردند که این عمل باعث دوام و بقای یک مخزن کامپوزیتی می‌شود.

۵. رنگ مخزن

درنهایت پس از اتمام ساخت مخزن، سطح آن توسط رنگ خاصی (پلی اورتان) پوشش داده‌می‌شود. این عمل علاوه بر حفاظت از قطعات خارجی مخزن باعث زیبایی کار نیز می‌گردد.

۵ مقایسهٔ انواع مخازن

انواع مختلف مخازن CNG در شکل ۸ به‌صورت مقایسه‌ای نشان داده شده‌اند. در این شکل نسبت وزن به حجم مخازن جهت مقایسه ارائه شده‌است.

از دیگر مشخصه‌های مخازن، راندمان حجمی[11] مخزن می‌باشد که از تقسیم حجم داخلی مفید مخزن بر حجم کل مخزن به‌دست می‌آید. به‌طور معمول مخازنی که از مواد با مقاومت کششی بالا ساخته می‌شوند، راندمان حجمی بیشتری دارند، چراکه این مواد با ضخامت کمتر می‌توانند فشار بالاتری را تحمل نمایند. به‌طور مثال یک مخزن نوع اول دارای راندمان حجمی ۹۰٪ بوده و یک مخزن نوع سوم با الیاف شیشه، دارای راندمان حجمی ۷۴٪ می‌باشد. در جدول ۲ نمونه‌هایی از طرح‌های مختلف مخازن، از نظر راندمان حجمی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

شکل ۸: انواع مخازن ذخیره‌سازی گاز طبیعی [۱۹].

[11] - Volumetric Efficiency

جدول ۲: مقایسهٔ راندمان حجمی مخازن گاز طبیعی [۱۷].

نوع مخزن	درصد راندمان حجمی
نوع۱: فولادی	۹۱
نوع۱: آلومینیومی	۷۸
نوع۲: فولاد- شیشه	۸۵
نوع۲: آلومینیوم- شیشه	۷۶
نوع۳: آلومینیوم- شیشه	۷۴
نوع۳: آلومینیوم- کربن	۸۴
نوع۴: کربن	۸۲
نوع۴: هیبرید	۷۷

۶ فناوری تولید مخازن گاز طبیعی فشرده

۶-۱ تولید مخازن نوع ۱

مخازن گاز طبیعی فشرده نوع ۱ معمولاً از مادهٔ اولیهٔ خام به سه شکل مختلف ورق، لوله یا شمشال تولید می‌گردند. بنابراین فرایند تولید مخازن نوع ۱ با استفاده از سه شکل مواد اولیهٔ مذکور مراحل تولید متفاوتی را درپی خواهد داشت. در تولید مخازن نوع ۱ شکل‌دهی این مواد خام بیشترین حجم کار را به‌خود اختصاص می‌دهد. در زیر به توضیح مراحل ساخت مخازن نوع ۱ با به‌کارگیری هر یک از سه نوع مادهٔ اولیه می‌پردازیم.

۶-۱-۱ تولید مخزن از مادهٔ اولیهٔ ورق

برای تولید مخازن فولادی نوع ۱ از ورق، در ابتدا ورق‌هایی از جنس AISI4130 یا AISI4140 انتخاب می‌شوند. ورق‌های فولادی در ابعاد و اندازه‌های گوناگونی توسط سازندگان ساخته می‌شوند. سازندگان مخازن باید با توجه به ابعاد و اندازه‌های مخازن تولیدی خود، ورق‌های مورد نیاز را طوری انتخاب کنند که کمترین دورریز را داشته باشند. بعد از این‌که ورق‌ها فراهم شدند عملیات آنیلینگ[۱۲] روی آن‌ها انجام می‌شود. بعد از این مرحله ورق‌های پیچیده‌شده، مسطح‌سازی می‌شوند و برای برش‌کاری آماده می‌گردند. ورق‌ها پس از آماده‌سازی به‌صورت دایروی و به ابعاد مورد نیاز طوری بریده می‌شوند که کمترین تنش‌های فشاری و ترک‌های احتمالی در آن‌ها به‌وجود آید. بعد از انجام برش‌کاری، ورق‌ها در سیکل روغنکاری قرار می‌گیرند، این عمل به‌منظور جلوگیری از به‌وجود آمدن آسیب‌های احتمالی حین مراحل بعدی انجام می‌شود. در مرحلهٔ بعد ورق‌ها تحت کشش عمیق سرد[۱۳] قرار می‌گیرند و به‌صورت لیوانی‌شکل در می‌آیند. روغن‌کاری قبل از عملیات کشش سرد اثرات اصطکاک را از بین می‌برد و باعث سهولت در انجام عملیات کشش می‌گردد.

بعد از انجام کشش عمیق سرد مجدداً مخازن آنیلینگ می‌شوند و سپس در سیکل روغنکاری قرار می‌گیرند. این عملیات برای بهتر انجام‌شدن کشش سرد عمیق بعدی، نرم‌شدن مخازن و تنش‌زدایی به‌کار می‌رود. سپس مجدداً مخازن تحت عملیات کشش سرد قرار می‌گیرند تا مخزن به ابعاد مورد نظر برسد. بعد از انجام این مراحل برای این‌که سطح استوانه‌ای

[12] - Annealing
[13] - Cold Deep-Drawing

مخزن دارای ضخامت‌های یکسانی باشد مخازن تحت عملیات فلوفرمینگ[۱۴] قرار می‌گیرند. در این مرحله عیوب ریخته‌گری موجود در ورق‌ها نیز تا حدودی از بین می‌رود. حال که قسمت استوانه‌ای مخازن آماده شده، باید سطح مخزن با استفاده از روش اولتراسونیک[۱۵] برای آزمایش این‌که سطح مخزن دارای ضخامت یکنواخت می‌باشد یا نه، مورد بازرسی قرار گیرد. برای شکل‌دادن به گلویی سر مخازن از دستگاه شکل‌دهی چرخشی گلویی[۱۶] استفاده می‌شود. این دستگاه یک دستگاه حدیده‌کاری چرخشی می‌باشد. بعد از انجام این مراحل ماشین‌کاری گلویی مخزن انجام می‌شود. با انجام این مرحله، مراحل مربوط به شکل‌دهی مخزن به اتمام می‌رسد. برای بالا بردن سختی مخازن و مقاومت آن‌ها در برابر ضربه‌های احتمالی و تنش‌زدایی تنش‌های پس‌ماند از عملیات شکل‌دهی، مخازن تحت عملیات سردکردن سریع[۱۷] و بازپخت[۱۸] قرار می‌گیرند. درهنگام شکل‌دهی مخازن و تحت عملیات حرارتی قرار گرفتن آن‌ها ضایعاتی در داخل و خارج آن‌ها از قبیل اکسیدها و غیره به‌وجود می‌آید. برای تمیزکاری این ضایعات، مخازن تحت عملیات ساچمه‌زنی[۱۹] قرار می‌گیرند. بعد از این مرحله مخازن تحت آزمون سختی‌سنجی[۲۰] قرار گرفته و سپس برای هرگونه عیب ظاهری و غیره تحت بازرسی چشمی قرار می‌گیرند و بعد از آن عملیات نهایی بر روی گلویی مخزن از قبیل تمیزکاری و رزوه‌کاری انجام می‌شود. پس از این مرحله مخازن تحت آزمون اولتراسونیک قرار می‌گیرند تا عیوب و نقایص موجود آشکار شود. در انجام این آزمون باید سطوح مخازن از هرگونه روغن، اکسید و

14 - Flow Forming
15 - Ultrasonic
16 - Neck Spinning
17 - Quenching
18 - Tempering
19 - Shot blasting
20 - Hardness Testing

سایر آلودگی‌ها پاک باشند زیرا وجود این آلودگی‌ها نتایج آزمون را دچار اشکال می‌کنند. بعد از تأیید مخازن با آزمون اولتراسونیک علامت‌گذاری مخازن آغاز می‌شود و اطلاعات لازم بر روی مخازن حک می‌شوند. این اطلاعات به‌صورت جزئی‌تر در بخش مربوطه خواهند آمد. بعد از این مراحل مخازن جهت انجام آزمون سنجش انبساط حجمی، تحت فشار هیدرواستاتیک قرار می‌گیرند تا انبساط حجمی آن‌ها در حد مجاز قرار گیرد. همچنین سطوح مخازن برای جلوگیری از اکسایش و زیبایی ظاهری، رنگ‌کاری و پوشش داده می‌شوند[۲۱]. درنهایت عملیات پایانی از جمله بازرسی نهایی بر روی مخازن انجام می‌شود و مخازن در جعبه‌های مخصوص، بسته‌بندی شده و آمادهٔ تحویل به مشتریان می‌گردند.

۶-۱-۲ تولید مخزن از مادهٔ اولیهٔ لوله

در تولید مخازن فولادی از لوله، لوله‌های بدون درز فولادی استفاده می‌شوند. ابتدا لوله‌ها با توجه به حجم مخزن مورد نیاز در طول مشخص بریده می‌شوند. سپس برای بستن یک سر لوله این لوله تحت عملیات شکل‌دهی چرخشی[۲۲] قرار می‌گیرد و یک سر مخزن بسته می‌شود. بعد از این مرحله داخل مخزن صاف‌کاری می‌شود و همچنین قسمت انتهایی آن به شکل نهایی خود در می‌آید. بعد از انجام این مرحله، لوله که دیگر به شکل مخزن در آمده‌است تحت عملیات فلوفرمینگ قرار می‌گیرد. پس از انجام این مرحله که ضخامت مخزن به حد مطلوب خود می‌رسد بازرسی اولتراسونیک روی مخزن برای اطمینان از یکسانی ضخامت سطح آن صورت می‌گیرد. سپس شکل‌دهی گلویی به‌روش چرخشی انجام می‌شود. بقیهٔ مراحل ساخت مخازن از لوله همانند ساخت مخازن از ورق بعد از شکل‌دهی گلویی می‌باشد.

---

[21] - Surface Coating
[22] - Spinning

۶-۱-۳ تولید مخزن از مادهٔ اولیهٔ شمشال

برای تولید مخازن از مادهٔ اولیهٔ شمشال[۲۳] در ابتدا شمشال‌ها را در اندازه‌های مورد نیاز برای ساخت مخازن برش می‌دهند و برای عملیات سوراخ‌کاری آماده می‌کنند. در مرحله سوراخ‌کاری با عملیات سوراخ‌کاری داغ[۲۴] قطعات شمشال را به‌صورت لیوانی‌شکل در می‌آورند. پس از این مرحله در طی عملیاتی ضخامت دیوارهٔ این قطعهٔ لیوانی‌شکل را تا اندازهٔ مورد نیاز کاهش می‌دهند و بعد از این مراحل از روش ساچمه‌زنی برای تمیزکاری استفاده می‌نمایند. بعد از آن‌که قطعات لیوانی‌شکل به‌صورت مخزن در آمدند، سطوح این مخازن مورد بازرسی قرار گرفته تا برای انجام مراحل بعدی مورد تأیید قرار گیرند. بعد از این مرحله، مراحل تولید مانند تولید مخازن از ورق و لوله می‌باشد، از قبیل شکل‌دهی گلویی به‌روش چرخشی، ماشین‌کاری گلویی و غیره.

۶-۲ تولید مخازن نوع۲

تولید مخازن نوع دوم شامل دو مرحلهٔ اصلی می‌باشد. در مرحلهٔ اول آستری مخازن با استفاده از روش‌هایی که در تولید مخازن نوع ۱ مطرح شدند از فولاد یا آلومینیوم تولید می‌شود و در مرحلهٔ دوم این لایهٔ آستری با الیاف پیچی پیوسته تقویت می‌شود. در این نوع مخازن لایهٔ الیاف فقط به‌صورت محیطی پیچیده می‌شود و درنتیجه قسمتی از فشار داخلی را تحمل می‌نماید.

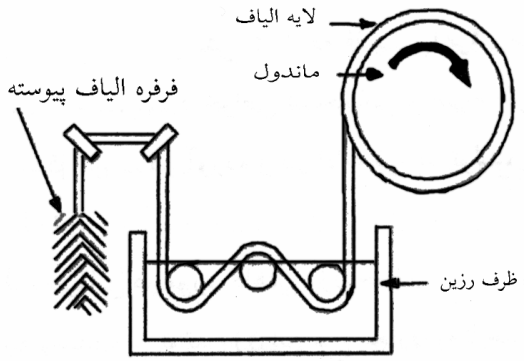
[23] - Billet
[24] - Hot Piercing

۶-۲-۱ الیاف‌پیچی

الیاف‌پیچی در مخازن نوع دوم به‌صورت محیطی مانند شکل ۹ انجام می‌شود. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود الیاف که معمولاً از جنس شیشه، کربن، آرامید یا هیبرید هستند در حوضچه‌های رزین، به رزین آغشته شده و به‌صورت شعاعی با دستگاه مخصوص الیاف پیچی به محیط آستری‌ها پیچیده می‌شوند. پس از این‌که الیاف‌پیچی تمام شد، مواد کامپوزیتی با استفاده از پروفیل دمایی کنترل‌شده و با پرکردن مخزن بین ۱۰۵ تا ۱۱۵ درصد مقدار حداقل آزمون فشار، اتوفرتاژ[۲۵] می‌شوند. رزین‌ها یکی از عوامل بسیار مهم در کارکرد مخازن کامپوزیتی می‌باشند. در ابتدای شروع گسیختگی، مواد ماتریسی که به الیاف اضافه می‌شوند نیروهای وارده را به اطراف منتقل می‌کنند، بنابراین باید استحکام رزین‌ها با استحکام الیاف هم‌خوانی داشته باشد. در طراحی و انجام فرآیند الیاف‌پیچی باید به موارد زیر توجه کرد:

- مواد الیاف، خواص مکانیکی و مشخصات مورد نیاز
- ترکیب الیاف، هندسهٔ رشته‌ها و عملکرد آن‌ها
- سیستم رزین، اجزای اصلی و مشخصات آن‌ها درجایی‌که به‌کار می‌روند.
- سیستم رزین، پخت مواد و مشخصات آن‌ها درجایی‌که به کار می‌روند.
- سیستم رزین، تسریع کننده‌ها، مواد و مشخصات آن‌ها درجایی‌که به‌کار می‌روند.
- ترکیب مواد پیچیده‌شده
- فرآیندهای پخت، دماها، دورهٔ زمانی و تلرانس‌ها

[25] - Autofrettage



شکل ۹: چگونگی الیاف پیچی به‌صورت محیطی [۲۷].

۶-۳ تولید مخازن نوع ۳

آستری این نوع مخازن یک جدارهٔ نازک آلومینیومی می‌باشد که روی آن به‌صورت محیطی و محوری به‌طور کامل پیچیده شده‌است[۲۶]. بنابراین این لایه‌های کامپوزیتی قادر به تحمل نیروها هم در جهت شعاعی و هم در جهت محوری خواهند بود. برای تولید آستری از لوله، ابتدا لولهٔ آلومینیومی به‌وسیلهٔ اکستروژن داغ[۲۷] مفتول آلومینیومی تهیه می‌شود و سپس سایر مراحل مانند تولید مخازن نوع ۱ از لوله می‌باشد.

۶-۳-۱ ساخت کامپوزیت‌های پیشرفته

دقت در الیاف پیچی سریع پیوسته طبق یک برنامهٔ از پیش تعیین‌شده، پایه و اساس فرایند الیاف‌پیچی می‌باشد. این فرایند به طراحان این توانایی را می‌دهد تا با استفاده از قراردادن دقیق خصوصیات مکانیکی در مکان‌های مورد نیاز، مخازنی با استحکام بالا تولید کنند. همچنین این

[26] - Fully Wrapped
[27] - Hot Extrusion

مسأله به طراحان اجازه می‌دهد تا مقاومت گرمایی، استحکام و سختی مواد را بهینه نمایند. مطالب فوق به این معنی است که مهندسان قدرت تغییر متغیرهای لازم را برای دستیابی به خصوصیاتی با خواست مشتریان خواهند داشت.

ماشین الیاف‌پیچی، یک ماشین کنترل عددی کامپیوتری (CNC) می‌باشد و از سیستم خودکار با کارایی بالایی برخوردار است، به‌طوری که راه‌اندازی و عمل کردن آن می‌تواند در چند دقیقه انجام گردد. این دستگاه محدود به الیاف پیچی در شکل‌های استوانه‌ای نمی‌باشد بلکه می‌توان هر شکل قابل‌تصوری را از طریق این دستگاه الیاف‌پیچی نمود.

تجهیزات دستگاه از مواد مختلفی مانند آهن، آلومینیوم، سرامیک و کامپوزیت ساخته می‌شوند. در دستگاه‌های پیشرفته می‌توان الیاف‌پیچی با ماتریس رزین و الیاف پخته‌شده را نه‌تنها در دمای اتاق بلکه بسته به نوع ماتریس رزین به‌کار رفته حتی در کوره‌ای با یک پروفیل دمایی کنترل شده انجام داد. قطر و خروج از مرکز محور بخوبی کنترل می‌شود تا با نگهداری سطح مشترک کامپوزیت و اجزای دستگاه بتوان هم‌مرکزی کامپوزیت نهایی را حفظ کرد و از کج‌شدن آن در امتداد طول جلوگیری نمود.

در ابتدا برای عملیات الیاف پیچی، قرقره‌های الیاف خشک طوری تنظیم می‌شوند که تنش مشخصی در الیاف به‌وجود آید. این کشیدگی، در پارامترهای مقاومت و سختی کامپوزیت تأثیر دارد. پس از این مرحله الیاف از حوضچه رزین عبور کرده و به رزین آغشته می‌شوند، سپس الیاف کشیده شده و عریض می‌شوند. در این مرحله الیاف آمادهٔ پیچیده شدن می‌باشند. الیاف بعد از خروج از حمام رزین توسط دستگاه الیاف‌پیچی CNC روی مخزن پیچیده می‌شوند. این پیچش بسته به نوع مخزن می‌تواند محیطی، محوری، مارپیچی[۲۸] (ضربدری) یا ترکیبی از آن‌ها

[28] - Helical

باشد. پس از پایان یافتن الیاف‌پیچی، مخازن از دستگاه خارج می‌شوند. در این مرحله پخت روی مخزن اجرا می‌شود. پخت رزین ماتریس، اثر مستقیمی بر عملکرد ساختار کامپوزیت دارد. برای بهینه‌سازی عملکرد کامپوزیت، زمان و دمای پخت کنترل می‌شوند. عمل کنترل توسط کنترل‌کننده‌های الکتریکی انجام می‌شود و دمای دیگ پخت را به‌صورت کنترل شده‌ای در دماهای مورد نظر نگه می‌دارند. این عمل تضمین می‌کند که ساختار کامپوزیتی به خصوصیات تعیین‌شده در طراحی رسیده‌است. بعد از اتمام مرحلهٔ پخت مخازن از دیگ پخت خارج می‌شوند و برای بسته‌بندی آماده می‌شوند. انجام این مراحل، مخازنی کم‌وزن و با کارایی بالا را نتیجه می‌دهد.

۴-۶ تولید مخازن نوع ۴

آستری این نوع از مخازن برخلاف مخازن نوع ۱، ۲ و ۳ به‌جای فولاد یا آلومینیوم از جنس پلیمرهایی نظیر پلی‌اتیلن سنگین (HDPE) می‌باشد. از آنجاکه آستری این مخازن پلیمری است، بنابراین باید نافی برای نصب شیر و سایر متعلقات از جنس فلز باشد. طراحی و ساخت مناسب این نافی از نشتی گاز در فشارهای بالا جلوگیری کرده و باعث آب‌بندی قسمت فلزی و پلیمری می‌شود. می‌توان از چسب برای آب‌بندی بهتر این قسمت استفاده کرد. برای تولید قسمت پلیمری از قالب‌گیری چرخشی استفاده می‌شود. در این روش قالب‌ها با زاویهٔ ۴۵ درجه چرخانده می‌شوند و حرارت داده می‌شوند تا گلوله‌های پلیمری ذوب‌شده و به‌شکل نیم‌استوانه درآیند. این عملیات برای نیمهٔ دیگر نیز تکرار می‌شود. بعد از این مراحل، قالب به‌صورت افقی قرار می‌گیرد و حرارت داده می‌شود تا قسمت استوانه‌ای آن، شکل گیرد. وظیفهٔ آستری، فراهم کردن یک مانع در مقابل فشار گاز می‌باشد. آستری به‌عنوان یک جزء ساختاری درنظر گرفته

نمی‌شود و با توجه به مزیت پایین بودن مدول الاستیسیتهٔ آن قادر خواهد بود همهٔ بار را به پوستهٔ ساختاری مخزن منتقل کند. یکی از فواید اولیهٔ آستر پلاستیکی حذف محدودیت‌های آسترهای فلزی در وضعیت خستگی‌های ناشی از سیکل عمری می‌باشد.

پوستهٔ کامپوزیتی ساختاری، یک کامپوزیت الیافی- اپوکسی پیوسته است که با الیاف پیچی تولید می‌شود. ساختمان اصلی پوستهٔ این مخازن یک ساختار هیبرید از الیاف کربن و شیشه می‌باشد. الیاف کربن عملکرد مقاومتی بالایی نسبت به وزن دارند، همچنین الیاف کربن خصوصیاتی از قبیل، مقاومت عالی در برابر خستگی، غیرحساس بودن به اثرات محیطی و عملکرد با اطمینان بالایی را دارا می‌باشند. الیاف شیشه خاصیت دوام مخازن را افزایش می‌دهد. این دو ماده یکدیگر را تقویت کرده و یک ساختار بادوام و با کارایی بالا را به‌وجود می‌آورند. روش الیاف پیچی مانند آنچه که برای مخازن نوع سوم ارائه شد، می‌باشد.

طرح شماتیکی از چگونگی الیاف پیچی به‌صورت محوری و محیطی در شکل ۱۰ برای مخازن نوع ۳ و ۴ آمده‌است.

شکل ۱۰: طرح شماتیکی از الیاف‌پیچی کامپوزیتی به دور لایهٔ آستری

۷ طراحی مخازن

۷-۱ الزامات طراحی

مخازن دارای فشار کاری ۲۰۰ bar در دمای ۱۵ °C برای گاز طبیعی می‌باشند که بیشینهٔ فشار پرکردن ۲۶۰ bar است. حداقل فشار آزمون به‌کار رفته در ساخت مخزن ۳۰۰ bar (۱/۵ برابر فشارکاری) می‌باشد. حداقل فشار انفجار در مخازن نوع اول نباید از ۴۵۰ bar کمتر باشد، برای مخازن کامپوزیتی نوع دوم، سوم و چهارم که دارای الیاف کربنی هستند، پوستهٔ کامپوزیتی می‌بایست دارای حداقل فشار انفجار ۴۷۰ bar باشد. برای مخازن نوع اول، همچنین برای آسترهای مخازن نوع دوم و سوم می‌بایست از فولاد یا آلومینیوم استفاده کرد. کامپوزیت نیز شامل الیاف شیشه، آرامید یا کربن است که با رزین‌های ترموست (اپوکسی، پلی‌استر، ونیل‌استر و غیره) یا رزین‌های پلی‌آمید، پلی‌اتیلن و غیره آغشته شده‌اند.

۷-۲ محدودیت‌های طراحی

محدودیت‌هایی که در طراحی مخازن اغلب خودروها مشترکند عبارتند از: وزن، قیمت و ایمنی. پارامتر وزن یکی از پارامترهای مهم است که در مورد ذخیرهٔ گاز در ایستگاه سوخت‌رسانی سیار نیز حائز اهمیت است. همچنین مسألهٔ ایمنی یکی از مسائلی است که همواره در کنار دو مسألهٔ دیگر باید مورد توجه قرار گیرد.

۳-۷ اصول حاکم برای طراحی مخازن CNG

در طراحی مخازن نوع اول، از استانداردهای مختلفی استفاده می‌شود. ضخامت مخزن از رابطهٔ مخازن جدارنازک به‌دست می‌آید. انتهای عدسی‌شکل مخزن[۲۹] به‌صورت نیمکره درنظر گرفته می‌شود. بدین لحاظ ضخامت وسط عدسی می‌بایست برابر یا بزرگتر از ضخامت پوستهٔ استوانه‌ای باشد. برای رسیدن به روابطی جهت به‌دست آوردن ضخامت لایه‌های کامپوزیتی، بعضی فرضیات منطقی در مورد طراحی لحاظ شده‌اند. این فرضیات عبارتند از:

۱. تمامی الیاف در مخزن تحت کشش می‌باشند.

۲. هنگامی‌که مخزن، تحت فشار قرار می‌گیرد هیچ گشتاور خمشی به‌وجود نمی‌آید.

۳. کل مقاومت سازه را مقاومت کششی در طول الیاف تشکیل می‌دهد.

۴. مخزن متقارن است و شامل یک قسمت استوانه‌ای شکل با دو انتهای نیمکره‌ای، می‌باشد.

۵. ضخامت مخزن در مقایسه با قطر آن ناچیز است، بنابراین می‌توان فرض کرد که قطر مخزن در لایهٔ خارجی و داخلی یکی است (مخازن جدارنازک هستند).

۶. الیاف آزاد هستند تا در هنگام تولید، خود را تنظیم کنند بنابراین هیچ‌گونه ناهمسانی در کشش آن‌ها وجود ندارد.

۷. هیچ تنش برشی بین دو لایهٔ مجاور وجود ندارد.

۸. الیاف‌پیچی به شیوه‌های محیطی یا ضربدری مطابق با تکنیک‌های عملی انجام می‌شود.

۹. الیاف‌پیچی محیطی در دو انتها عملی نمی‌باشد.

[29] - Convey End

۱۰. الیاف‌پیچی مارپیچی در سرتاسر طول مخزن پیوسته است.

۱۱. فشار در داخل مخزن هیدرواستاتیکی است.

باید توجه داشت که در مخازن نوع دوم و سوم بر طبق استاندارد، در فشار داخلی صفر و در حالتی که فشار اتوفرتاژ داریم تنش در آستر نباید از ۹۵٪ تنش تسلیم آن بیشتر شود و همچنین در فشار کاری نیز تنش در آستر نباید از ۶۰٪ تنش تسلیم بیشتر باشد.

۷-۴ مراحل انجام طراحی

برای انجام طراحی باید مراحل زیر را طی کرد:

۱. مشخص‌کردن مقدار گازی که باید ذخیره شود (از قانون گازهای کامل می‌توان برای محاسبهٔ مورد نظر استفاده کرد).

۲. مشخص‌کردن حجم گاز فشرده‌شده که همان حجم داخلی مخزن CNG است.

۳. قطرهای داخلی و خارجی مخزن براساس فرمول حداکثر تنش تعیین می‌شوند. قطر و ضخامت دیوارهٔ مخزن CNG به‌وسیلهٔ حداکثر تنش در سطح داخلی مخزن به‌دست می‌آید. حداکثر تنش معمولاً به‌وسیلهٔ حداکثر تنش مجاز براساس جنس ماده محدود می‌شود (با درنظر گرفتن یک ضریب اطمینان).

۴. طول را می‌توان با توجه به حجم مورد نظر تعیین کرد.

۷-۵ مراحل محاسبهٔ قیمت مخزن

برای محاسبهٔ قیمت مخزن باید دو بخش کلی را درنظر گرفت:

۱. هزینهٔ ثابت مربوط به رگولاتورها، شلنگ‌ها، شیرها و هزینهٔ کارکرد و غیره ($Cost_1$)

۲. قیمت مخزن به‌صورت تابعی از وزن ($Cost_2$)

$$Cost = Cost_{1+} Cost_2$$

۸ استانداردهای مخازن

گاز طبیعی فشرده که به‌عنوان سوخت در خودروها به‌کار می‌رود تا فشار ۲۰۰ bar فشرده می‌شود. وجود فشار بالا در سیستم سوخت‌رسانی این خودروها و تجهیزات مرتبط با آن‌ها نظیر تجهیزات سوخت‌گیری و کمپرسورها، این نیاز را ایجاد می‌کند که الزامات ایمنی بالایی در این تجهیزات رعایت شود. در ایران به موازات توسعه این صنعت توجه به تدوین استانداردها و مقررات و نیز کیفیت و ایمنی آغاز شده و تعداد قابل توجهی استاندارد مرتبط با CNG به وضعیت استاندارد ملی در آمده‌است. سازمان‌های بین‌المللی که در این زمینه فعالیت دارند ISO و CEN می‌باشند که هر کدام از کمیته‌های فنی مسئولیت تدوین یک مجموعه استاندارد مرتبط با یک موضوع را به‌عهده دارند. در سازمان بین‌المللی استاندارد ISO گروه TC8SC3 WG17 روی استانداردهای مخازن کار می‌کنند. در کمیته اروپایی استاندارد CEN، گروه TC326، روی مخازن ذخیره خودروهای NGV و گروه TC282 روی سیستم‌های کوچک ذخیره مخازن CNG کار می‌کنند. برخی از استانداردهای معروف در این زمینه عبارتند از:

۱. ISO 15501-1 سیستم سوخت خودرو با گاز طبیعی فشرده – الزامات ایمنی.

۲. ISO 15501-2 سیستم سوخت خودرو با گاز طبیعی فشرده – روش‌های آزمون.

۳. ISO 11439 مخازن گاز – مخازن گاز طبیعی فشرده و پرفشار برای ذخیره روی خودرو.

برخی از استانداردهای رایج بین‌المللی در جدول ۳ خلاصه شده‌اند. همزمان با توسعه و گسترش استفاده از سوخت CNG در خودروها، کشورهای مختلف مجموعه‌ای از استانداردها را در این زمینه پذیرفته‌اند. در هر حال نیاز به یک استاندارد بین‌المللی در این زمینه حس می‌شد. در این زمینه استاندارد ISO موارد خاصی را برای سوخت CNG طی چندین سال تهیه کرده‌است. این استاندارد به طراحی و ساخت مخازن ذخیرهٔ گاز برای خودروهای مختلف کمک می‌کند. این استاندارد هم‌اکنون در حال توسعه و گسترش برای تبدیل به یک استاندارد کامل است. فعالیت‌های لازم جهت نیل به استاندارد توسعه‌یافته در این زمینه توسط ANGV در حال انجام است که هدف آن تدوین استانداردی خاص برای مخازن CNG است. در این زمینه یک گروه متخصص از طرف کمیتهٔ بین المللی ISO جهت فعالیت و بررسی‌های لازم تعیین شده‌است.

جدول ۳: برخی از استانداردهای رایج بین‌المللی [۲۸].

کد استاندارد	دبیرخانه – سازمان حمایت کننده
ISO11439	ISO-IANGV (تصویب‌شده به‌عنوان استاندارد CEN)
ECER110	سازمان ملل
ANSI/CSANGV2	موسسهٔ استاندارد کانادا
CSAB5Pt2	کانادا
METI/KHK9	ژاپن
FMVSS304	مدیریت ملی ایمنی ترافیک بزرگراه‌ها وابسته به وزارت راه ایالات متحده

۸-۱ استاندارد ISO

هدف نهایی گروه TC8SC3 WG17، ارائهٔ گواهی با عنوان مخازن تحت فشار بالا روی خودرو، برای ذخیره گاز طبیعی به‌عنوان یک سوخت، می‌باشد. نیازمندی‌های استاندارد براساس عملکرد چندین ساله این کمیته در سراسر جهان است (به‌خصوص در ایتالیا، نیوزیلند، کانادا و ایالات متحده). استانداردها براساس فشار پایهٔ ۲۰۰ bar و دمای استاندارد ۱۵ $^{\circ}C$ تدوین شده‌اند. این استانداردها اجازهٔ استفاده از سایر فشارها را مشروط بر طراحی و ساخت تجهیزات، براساس آن فشار می‌دهند. موارد و خواسته‌های منحصر به‌فرد استاندارد بیشتر در زمینهٔ ماده، جنس، روش‌های شکل‌دهی و ساخت سیستم‌های گازسوز می‌باشد. استاندارد، نیازهای خاص صنایع اتومبیل‌سازی را درنظر گرفته و همچنین نیازمندی‌های ذخیرهٔ یک گاز غیرهمگن در محل ثابتی در خودرو را با امکان شارژ مجدد به دفعات زیاد و محدودیت‌های مخازن گاز طبیعی درنظر می‌گیرد.

در استانداردهای پیشین اکثر مواردی که در مورد مخازن ذخیره گاز معین شده بودند مربوط به ذخیره گاز، تحت فشار بالا در استفاده‌های صنعتی مختلف بود. ولی تعدادی از کارافتادگی در این مخازن مشاهده شد که نشان داد طراحی و ساخت این مخازن برای خودروهای گازسوز چندان مناسب نیست. استاندارد جدید به‌دنبال روش‌هایی جهت ساخت مخازنی مقاوم و سبک برای استفاده در خودروهای گازسوز می‌باشد که قیمت این مخازن کم بوده و دارای ایمنی کافی جهت عمر طولانی تحت فشار بالا، باشد. بدین ترتیب مواردی در این استانداردها مشخص شد که جزئیات سرویس‌دهی، طراحی و نحوهٔ استفاده از مخازن فشاربالای گاز را در خودروهای گازسوز مشخص نمودند. همچنین استانداردها به‌دنبال تأمین اطمینان

ساخت مخازن فشاربالا به‌طوری بودند که عمر این مخازن از مقدار زمان کارکرد این مخازن در خودرو، بیشتر باشد تا در طول عمر مفید خود دچار خستگی، از کارافتادگی و شکست نگردند. این مسأله به نشت پیش از شکست[۳۰] (LBB) موسوم است و درحال حاضر یکی از مهمترین قسمت‌های طراحی مخزن گاز طبیعی است.

مطابق با استانداردهای جدید، مخازن گاز باید در انتهای عمر مفید خود از کار افتاده شوند. همیشه عمر مخزن بیش از عمرخودرو است یعنی قبل از این‌که مخزن از کار افتاده شود عمر مفید خودرو پایان یافته‌است. عمر کلی و دراز مدت مخازن به عواملی مثل شرایط کاری، شرایطی که مخزن تحت آن شرایط نگهداری می‌شود و فشار پرشدن مخزن بستگی دارد. توجه خاصی به مخازن فشاربالای کامپوزیتی در این زمینه‌ها شده‌است، زیرا از نظر آسیب‌های مکانیکی وارده حساس‌تر هستند.

۸-۲ تعدادی از استانداردهای مخازن CNG

در این‌جا به بررسی برخی از استانداردهای موجود در زمینهٔ مخازن گاز طبیعی روی خودروها می‌پردازیم.

۸-۲-۱ استاندارد ISO/FDIS/11439 (CNG4)

این استاندارد[۳۱] بین‌المللی درخصوص طراحی، روابطی را ارائه نمی‌کند بلکه الزاماتی را توصیه می‌کند که با استفاده از این الزامات کفایت طراحی تأیید می‌شود. این استاندارد شامل کلیات زیر می‌باشد:

---

30 - Leak Before Burst

31 - GAS Cylinder-High Pressure Cylinders for the On-board Storage of Natural Gas as a Fuel for Automotive Vehicles

۱. الزامات مواد مورد استفاده در ساخت مخزن شامل رزین، الیاف، آستری و نافی فلزی

۲. الزامات طراحی شامل فشار آزمون (۱/۵ برابر فشار کاری)، فشار ترکیدن مطابق با جدول تحلیل تنش برشی و محوری در لایه‌های داخلی مخزن، قرارگیری نازل در انتهای عدسی‌شکل به‌صورت عمودی و در مرکز محافظت در برابر آتش، اطمینان کافی از عمل‌نمودن وسایل تخلیه فشار. در این حالت می‌بایست نسبت تنش[۳۲] و فشار ترکیدن[۳۳] مطابق با شرایط موجود در استاندارد تعیین شود. این مقادیر در جدول ۴ به‌عنوان نمونه برای مخازن نوع ۴ فهرست شده‌اند.

جدول ۴: مقادیر حداقل فشار ترکیدن و نسبت‌های تنش در مخازن نوع ۴[۲۰].

نوع الیاف	نسبت تنش	فشار ترکیدن (bar)
شیشه	۳/۶۵	۷۳۰
آرامید	۳/۱۰	۶۲۰
کربن	۲/۳۵	۴۷۰
هیبرید	مطابق با استاندارد	مطابق با استاندارد

۳. الزامات ساخت مخزن، شامل چگونگی ساخت آستری، نحوه و شرایط الیاف‌پیچی روی مخزن، نحوه و شرایط پخت مخزن، کنترل کیفیت رزوه‌های نافی و محافظت مخزن در برابر شرایط محیطی.

۴. الزامات آزمون مخزن. این استاندارد بیشترین توجه را به آزمون‌های محصولات دارد. به‌عبارتی چنان‌چه مخزن ساخته‌شده بتواند آزمون‌های پیش‌بینی‌شده در این استاندارد را

---

[۳۲] - نسبت تنش عبارت است از تنش موجود در الیاف در حداقل فشار ترکیدن مشخص‌شده، تقسیم بر تنش موجود در الیاف در فشار کاری.

[۳۳] - نسبت ترکیدن برابر است با نسبت فشار واقعی ترکیدن مخزن به فشار کاری.

با موفقیت پشت سر بگذارد آنگاه الزامات چندگانه برآورده شده و کفایت طراحی تأیید می‌گردد.

۸-۲-۲ استانداردهای رایج در ایالات متحده

دو گروه استاندارد رایج برای مخازن CNG در ایالات متحده وجود دارد.

1 - ANSI/AGA NGV2

2 - DOTNHTSA STANDARD FMVSS304

پیش از این استانداردها، مخازن براساس استانداردهای بهبودیافته توسط انجمن گاز فشرده[۳۴] طراحی و ساخته می‌شدند. این استانداردها هم‌اکنون به نام FRP-1 برای مخازن نوع ۳ و FRP-2 برای مخازن نوع ۲ شناخته می‌شوند. که در جدول ۵ فهرست شده‌اند.

جدول ۵: خلاصه‌ای از استانداردهای مخزن در ایالات متحده [۲۶].

نوع استاندارد	نمایندگی مسئول	آخرین نسخه	توضیحات
NGV2	ANSI/AGA	۱۹۹۲	شامل دو طرح آزمون کیفیت از قبیل ضربه و مقاومت به آتش
FMVSS304	DOT/NHTSA	۱۹۹۶	شبیه به قبلی اما با تعداد آزمون‌های کیفی کمتر
FRP	CGA/DOT	۱۹۹۰	ابتدا توسط CGA توسعه یافت و سپس به‌وسیله سازندگانی که دارای مجوز DOT بودند استفاده شد

[34] - Compressed Gas Association

(الف) استاندارد مخازن براساس ANSI/AGA, NGV2-1992

ذخیره‌سازی گاز طبیعی تحت فشار در مخزن برای خودروها در استاندارد NGV2 از سه جهت بر ایمنی مخزن نظارت می‌کند:

۱. محدودهٔ مجاز مواد مورد استفاده
۲. آزمون‌های کیفیت طراحی
۳. آزمون‌های کنترل کیفی و ساخت

مواد مجاز و قابل‌قبول در NGV2 به فولاد 4130 یا معادل آن آلیاژهای آلومینیوم (AA6061 یا AA6010) و برخی مواد کامپوزیتی محدود می‌شود. تعدادی از آزمون‌های مطرح‌شده در این استاندارد عبارتند از: سیکل فشار در شرایط محیطی، انفجار، ضربه، آتش‌سوزی، شلیک گلوله و غیره.

در این استاندارد در هر دوره ۳۶ ماهه مخازن به‌صورت چشمی از لحاظ صدمات بیرونی و خرابی احتمالی مورد بررسی قرار می‌گیرند. بازرسی توسط یک شخص خبره و کارشناس، مطابق با معیارهایی که سازنده براساس آن موفق به کسب مجوز CGA شده و با دستورالعمل‌های CGA (C-6.1 برای نوع ۱ و C-6.2 برای انواع دیگر مخازن) مطابقت داشته باشد، صورت می‌گیرد.

(ب) استاندارد خودروهای موتوری فدرال (FMVSS)[۳۵]

ذخیره‌سازی گاز طبیعی تحت فشار در مخازن مخصوص مطابق استاندارد FMVSS304 شبیه به NGV2-92 می‌باشد. این استاندارد نیز از سه جهت بر ایمنی مخزن نظارت می‌کند.

۱. محدودهٔ مجاز مواد مورد استفاده

[35] - Federal Motor Vehicle Standard 304

۲. آزمون‌های کیفیت طراحی

۳. آزمون‌های کنترل کیفی و ساخت

مواد مجاز و قابل قبول در استاندارد FMVSS 304 به فولاد 4130، آلیاژهای آلومینیوم (AA6061 یا AA6010) و مواد کامپوزیتی که باید شامل الیاف شیشه‌ای، آرامید یا کربنی[۳۶] در یک رزین اپوکسی، پلی‌استر و فیل‌استر یا ترموپلاستیک باشد، محدود می‌شوند. آزمون‌های اصلی کیفیت طراحی در FMVSS 304 شامل سیکل فشار، انفجار و آتش‌سوزی می‌باشند. بازرسی چشمی، هر سه سال یا ۳۶۰۰۰ مایل طی مسافت (هر کدام زودتر اتفاق بیافتد) انجام می‌شود.

(ج) استاندارد GA/DOT FRP-1 & FRP-2

استانداردهای FRP-1 و FRP-2 از سه جهت بر ایمنی مخزن نظارت می‌کنند.

۱. محدودهٔ مجاز مواد مورد استفاده

۲. آزمون‌های کیفیت طراحی

۳. آزمون‌های کنترل کیفی و ساخت

مواد مجاز و قابل قبول در FRP-1 و FRP-2 فولاد 4130، آلیاژهای آلومینیوم (AA6061 یا AA6010) و مواد کامپوزیتی با الیاف شیشه‌ای نوع E یا S در رزین اپوکسی می‌باشند. الیاف کربنی در این استاندارد مجاز نیستند. آزمایش‌های اصلی آزمون کیفیت طراحی در FRP-1 و FRP-2 عبارتند از: سیکل فشار، سیکل فشار در شرایط محیطی، انفجار، شلیک گلوله و آتش‌سوزی.

[36] - Aramid or Carbon, E-glass, S-glass

۸-۲-۳ استانداردهای ملی ایران

در این بخش به مروری اجمالی از استانداردهای ملی ایران و این‌که آن‌ها چگونه ایمنی و دوام را تحت بررسی قرار می‌دهند، پرداخته می‌شود. پاره‌ای از این استانداردها در جدول ۶ فهرست شده‌اند. مشاهده می‌شود که استانداردهای مذکور تا حد معقولی با یکدیگر هماهنگ هستند و الزامات فنی آن‌ها با یکدیگر یکپارچه است. درنتیجه مخزنی که الزامات یک استاندارد را پشت سر بگذارد به احتمال قوی الزامات سایر استانداردها را نیز برآورده خواهد کرد. این استانداردها مانند سایر استانداردها عملکرد را محور اصلی قرار می‌دهند و وارد جزئیات فرآیند ساخت و مواد نمونه نمی‌شوند. به این دلیل درصورت رعایت نکات ایمنی و قابلیت اعتماد[۳۷] امکان ورود فناوری‌های جدید را به این حیطه فراهم می‌نمایند.

آزمون‌های ارزیابی کیفی این استانداردها نمایندهٔ الزامات استفاده میدانی هستند و به تحمل آسیب، مقاومت محیطی و دوام، طی عمرکاری ۲۰ ساله مخزن مرتبط هستند. برآوردن این الزامات آزمون، ایمنی را طی عمرکاری مخزن تضمین می‌نماید.

استانداردهای مرتبط با مخزن، شامل استانداردهای اجزاء نیز می‌باشند، مثل استانداردهای سری ISO 15500 برای اجزای خودرو گازسوز، ANSI/IAS PRDI برای وسایل اطمینان تخلیه فشار (PRD) و استاندارد ANSI/AGA NGV 3.1 برای اجزای سیستم و NFPA52 و ISO 15500 برای سیستم سوخت خودروی گازسوز.

[37] - Reliability

جدول ۶: استانداردهای ملی ایران

عنوان استاندارد	شماره استاندارد ملی
اجزاء سیستم سوخت خودرو با سوخت گاز طبیعی فشرده‌شده-شرایط عمومی	۵۶۳۶-۱
اجزاء سیستم سوخت خودرو با سوخت گاز طبیعی فشرده‌شده-عملکرد	۵۶۳۶-۲
اجزاء سیستم سوخت خودرو با سوخت گاز طبیعی فشرده‌شده-شیر یک طرفه	۵۶۳۶-۳
اجزاء سیستم سوخت خودرو با سوخت گاز طبیعی فشرده‌شده-شیر دستی	۵۶۳۶-۴
اجزاء سیستم سوخت خودرو با سوخت گاز طبیعی فشرده‌شده-شیر دستی مخزن	۵۶۳۶-۵
اجزاء سیستم سوخت خودرو با سوخت گاز طبیعی فشرده‌شده—شیر خودکار	۵۶۳۶-۶
اجزاء سیستم سوخت خودرو با سوخت گاز طبیعی فشرده‌شده-نشاندگر فشار	۵۶۳۶-۸
اجزاء سیستم سوخت خودرو با سوخت گاز طبیعی فشرده‌شده-تنظیم‌کننده فشار	۵۶۳۶-۹
اجزاء سیستم سوخت خودرو با سوخت گاز طبیعی فشرده‌شده-تنظیم‌کننده جریان گاز	۵۶۳۶-۱۰
اجزاء سیستم سوخت خودرو با سوخت گاز طبیعی فشرده‌شده-مخلوط کننده	۵۶۳۶-۱۱
اجزاء سیستم سوخت خودرو با سوخت گاز طبیعی فشرده‌شده-شیر اطمینان	۵۶۳۶-۱۲
اجزاء سیستم سوخت خودرو با سوخت گاز طبیعی فشرده‌شده-وسیله اطمینان تخلیه فشار	۵۶۳۶-۱۴
اجزاء سیستم سوخت خودرو با سوخت گاز طبیعی فشرده‌شده-محفظه گازبندی و شلنگ تهویه	۵۶۳۶-۱۵
اجزاء سیستم سوخت خودرو با سوخت گاز طبیعی فشرده‌شده-لوله‌های سوخت انعطاف‌پذیر	۵۶۳۶-۱۶
اجزاء سیستم سوخت خودرو با سوخت گاز طبیعی فشرده‌شده-لوله‌های‌سوخت انعطاف‌ناپذیر	۵۶۳۶-۱۷
اجزاء سیستم سوخت خودرو با سوخت گاز طبیعی فشرده‌شده-فیلتر	۵۶۳۶-۱۸
اجزاء سیستم سوخت خودرو با سوخت گاز طبیعی فشرده‌شده-اتصالات	۵۶۳۶-۱۹
سیستم‌های سوخت خودرو با سوخت گاز طبیعی فشرده‌شده-قسمت اول-الزامات ایمنی	۵۷۶۴-۱
سیستم‌های سوخت خودرو با سوخت گاز طبیعی فشرده‌شده - قسمت دوم – روش‌های آزمون	۵۷۶۴-۲
اتصال سیستم سوخت‌گیری خودروها با سوخت گاز طبیعی	۵۷۶
ویژگی‌های مخازن گاز طبیعی فشرده برای خودرو	در دست تدوین

۹ آزمون‌های مخازن CNG

در حال حاضر، دلایل موجهی وجود دارد که نشان می‌دهد استفاده از مخازن گاز طبیعی با فشار بالا، برای کاربرد خودروها ریسک کمتری نسبت به مخازن سوخت بنزین دارد. از آنجاکه گزارش‌های ایمنی مربوط به خودروهای گازسوز به‌طور گسترده پذیرفته شده‌است، بنابراین دامنهٔ تقاضا برای افزایش کاربرد آن به‌عنوان سوخت، افزایش یافته‌است. در مقایسه‌ای که بین خطرهای احتراق توسط LPG و CNG انجام شده‌است (در سال ۱۹۹۵ توسط سازمان گاز ژاپن) مشخص شده‌است که در تمامی موارد، مقایسه طول مدت زمان حضور گاز قابل‌اشتعال، حد پایین گرمایی محدودهٔ احتراق و گسترش گاز قابل‌اشتعال، CNG نسبت به LPG ایمن‌تر می‌باشد.

نیازهای تکنیکی مستقیم و آزمایش‌های پیشنهادشده، در قوانین ایمنی مطرح شده‌اند. بخشی از این قوانین مربوط به عملکرد معمولی مخازن و بخشی دیگر نیازهای تکنیکی مخازن و قابلیت‌های آن‌ها در شرایط غیرمعمول و اضطراری می‌باشد. برای آن‌که تولید یک مخزن در بازار موفق باشد باید ضمن آن‌که بتواند پاسخگوی آزمایش‌های ایمنی مربوطه باشد، از نظر وزن و قیمت نیز مناسب و رقابتی باشد.

۹-۱ آزمون‌های کیفی حین تولید

درهنگام ساخت مخازن CNC لازم است تا برخی از آزمون‌ها روی مخازن انجام گیرد این آزمون‌ها عبارتند از بازرسی اولتراسونیک، آزمون سختی‌سنجی، آزمون تعیین حجم و کنترل‌های لازم برای مخازن کامپوزیتی.

۹-۱-۱ بازرسی اولتراسونیک

با انجام بازرسی اولتراسونیک عیوب و نقایص به‌وجود آمده در هنگام شکل‌دهی مخازن قابل تشخیص می‌باشند. همچنین می‌توان اندازهٔ دقیق ضخامت مخازن را بدین وسیله تعیین نمود. کار با تجهیزات آزمون باید توسط افراد متخصص مطابق با یک استاندارد ملی یا بین‌المللی انجام شود. سطوح داخلی و خارجی مخازن که بدین روش تحت آزمون قرار می‌گیرند باید در شرایط مناسب باشند و انجام این آزمایش باید دقیق و تکرارپذیر باشد. منظور از شرایط مناسب این است که سطوح باید کاملاً تمیز و عاری از هرگونه اکسید و روغن باشند زیرا این موارد در نتایج آزمون اختلال ایجاد می‌کنند.

۹-۱-۲ آزمون سختی‌سنجی

پس از اتمام عملیات حرارتی روی مخازن، سطح هر مخزن باید تحت آزمون سختی‌سنجی قرار گیرد. چهار آزمون سختی‌سنجی روی مخازن انجام می‌شود. دو آزمون در یک انتها به فاصلهٔ زاویه‌ای ۱۸۰ درجه و دوتای دیگر در انتهای دیگر مخزن به فاصلهٔ زاویه‌ای ۱۸۰ درجه از یکدیگر انجام می‌گیرند. مقدار حداقل سختی در این چهار آزمون انتخاب می‌شود. این اندازه باید در محدودهٔ ۳۰۶-۲۴۵ برینل[۳۸] باشد. هنگامی‌که مقدار سختی از مقدار بیشینه آن تجاوز کند تعداد دو آزمون یا بیشتر انجام می‌شود. هنگامی‌که نتایج مورد قبول نباشند مخازن دوباره عملیات حرارتی می‌شوند و برای آزمون مجدد آماده می‌شوند.

[۳۸] - برینل واحد اندازه‌گیری مقدار سختی در آزمون سختی‌سنجی می‌باشد.

۹-۱-۳ آزمون تعیین حجم

بعد از این‌که بازرسی اولتراسونیک و آزمون سختی‌سنجی انجام شدند و مخازن مورد تأیید قرار گرفتند. همهٔ مخازن از آب پر شده و حجم آبی آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود در صورتی‌که حجم آبی مخزن در محدوده قابل‌قبولی باشد مخزن تأیید شده و به قسمت علامت‌گذاری منتقل می‌شود تا اطلاعات لازم بر روی آن حک گردد.

۹-۱-۴ کنترل‌های لازم برای مخازن کامپوزیتی

۱. کنترل عرض الیاف
۲. کنترل کشش الیاف
۳. کنترل لزجت رزین
۴. کنترل مقدار رزین در مخلوط و کنترل دمای رزین در حوضچه رزین
۵. کنترل مقدار رزین روی الیاف و کنترل زاویه لایه‌گذاری الیاف

۹-۲ آزمون‌های تأیید ایمنی مخازن

آزمون‌های تأیید ایمنی مخزن را می‌توان براساس اهداف آن‌ها به سه نوع تقسیم کرد. هریک از آزمون‌ها در یکی از این رده‌ها قرار می‌گیرند. این سه رده عبارتند از:

۱. آزمون‌های تحمل آسیب
۲. آزمون‌های محیطی
۳. آزمون‌های چرخهٔ عمر

- **آزمون‌های تحمل آسیب**

۱. آزمون گلوله

۲. آزمون سقوط

۳. آزمون تحمل خرابی (رواداری شکاف روی بخش مواد مرکب)

۴. آزمون تصادف (فقط در استاندارد DOT/NMTSA FMVSS 303)

- **آزمون‌های محیطی**

۱. مایعات خورنده

۲. دماهای حدی بالا و پایین

۳. تسریع گسیختگی تحت تنش

۴. قرارگیری در معرض آتش[۳۹]

- **آزمون‌های چرخهٔ عمر**

۱. ترکیدن

۲. چرخهٔ فشار در دمای محیط

۳. نشت پیش از شکست (LBB)

۴. چرخهٔ گاز طبیعی

خلاصه‌ای از آزمون‌های مطرح شده در استانداردهای مختلف، در جدول ۷ فهرست شده‌است. در ذیل به شرح هر یک از آزمون‌های مندرج در جدول ۷ پرداخته می‌شود:

۱. آزمون مواد اولیه: در این آزمون بسته به مورد، آزمون‌های مقاومت کششی، خوردگی، مقاومت در برابر بار وارده، ضربه، ترک‌خوردگی تحت تنش سولفیدی و در مورد لایه‌های داخلی پلاستیکی، آزمون‌های خمیری‌شدن و خزش در دماهای بالا در مورد مخزن انجام می‌شوند.

[39] - Bonfire

۲. آزمون ترکیدن تحت فشار هیدرواستاتیک: در این آزمون، نمونه‌ها با آب پر شده و تا مرحله ترکیدن تحت فشار قرار می‌گیرند که باید حداقل فشار ترکیدن در طراحی برای مخزن تعیین‌شده را پشت‌سر بگذارند که این حداقل فشار از ۴۵۰ bar کمتر نخواهد بود.

۳. آزمون چرخهٔ فشار در دمای محیط: در این آزمون مخازن نمونه با یک سیال غیرخورنده پر شده و تحت چرخهٔ فشار ۲۰ bar تا ۲۶۰ bar قرار می‌گیرند. نرخ چرخهٔ فشار باید کمتر از ۱۰ چرخه در هر دقیقه باشد. مخازن نباید پیش از رسیدن به ۱۰۰ برابر عمرکاری (برحسب سال) خراب شوند.

۴. آزمون نشت پیش از شکست: در این آزمون، مخازن نمونهٔ تکمیل‌شده، تحت چرخهٔ فشار بین ۲۰ bar الی ۳۰۰ bar قرار می‌گیرند. نرخ چرخهٔ فشار باید کمتر از ۱۰ چرخه در هر دقیقه باشد. این مخازن باید بر اثر نشت مردود شوند و نه گسیختگی، یا این‌که بیش از ۴۵۰۰۰ چرخه مقاومت کنند.

۵. آزمون قرارگیری در معرض آتش: این آزمون، به‌منظور حصول اطمینان از عملکرد صحیح وسیلهٔ اطمینان تخلیهٔ فشار و شیر مخزن انجام می‌شود و بسته به مورد، یک یا دو مخزن، از گاز طبیعی پر شده و به‌صورت افقی با فاصلهٔ ۱۰۰ میلی‌متر بالاتر از منبع آتش قرار می‌گیرند. منبع آتش باید ۱/۶۵ متر طول داشته و کل قطر مخزن را بپوشاند. در این آزمون مخزن نباید منفجر شود و باید گاز از وسیلهٔ اطمینان تخلیه فشار، تخلیه شود. در طی این آزمون دمای سطح مخزن حداقل توسط سه ترموکوپل اندازه‌گیری می‌شود. درطی ۵ دقیقه بعد از آغاز اشتعال، دست‌کم باید یکی از ترموکوپل‌ها دمایی برابر یا بیشتر از ۵۹۰ درجهٔ سانتی‌گراد را نشان دهد. این حداقل دما باید در تمام طول آزمایش حفظ شود. یک لایهٔ فلزی محافظ برای جلوگیری از تماس مستقیم شعله با شیرآلات

باید درنظر گرفته شود ولی لایه نباید با آن‌ها تماس داشته باشد. درحین انجام آزمون مخزن، شیرآلات، لوله‌ها و اتصالات نباید دچار خرابی شوند.

۶. آزمون نفوذ گلوله: یک مخزن با گاز فشرده تا فشار ۲۰۰ bar پر شده و تحت شلیک یک گلوله جنگی با قطر ۷/۶۲ mm قرار می‌گیرد. گلوله باید طوری به مخزن اصابت کند که از یک سمت دیواره مخزن عبور کند. مخزن نباید دچار گسیختگی یا انفجار شود. در مخازن نوع ۲، ۳ و ۴ باید گلوله تحت زاویه ۴۵ درجه به جدارهٔ مخزن برخورد کند.

۷. آزمون محیط اسیدی: ناحیه‌ای از سطح مخزن به‌صورت دایره‌ای به قطر ۱۵۰ mm که تحت فشار هیدرواستاتیک ۲۶۰ bar است به‌مدت ۱۰۰ ساعت در معرض محلول اسید سولفوریک با غلظت ۳۰ درصد (اسید باتری با وزن مخصوص ۱/۲۱۹) قرار می‌گیرد و تا مرحلهٔ ترکیدن افزایش می‌یابد. فشار ترکیدن باید بیش از ۸۵ درصد حداقل فشار طراحی ترکیدن باشد.

۸. آزمون تحمل خرابی (رواداری شکاف بر روی بخش مواد مرکب): این آزمون تنها برای مخازن نوع ۲، ۳ و ۴ به‌کار می‌رود. دو شکاف، یکی به‌طول ۲۵ mm و به‌عمق ۱/۲۵ mm و دیگری به‌طول ۲۰۰ mm و عمق ۰/۷۵ mm در جهت طولی، روی جداره مخزن ایجاد می‌شوند و مخزن در دمای محیط تحت فشار ۲۰ bar تا ۲۶۰ bar قرار می‌گیرد. چرخهٔ فشار ابتدا به تعداد ۳۰۰۰ چرخه و پس از آن به‌تعداد ۱۲۰۰۰ چرخهٔ دیگر انجام می‌شود. مخزن در چرخهٔ اول نباید گسیخته شود ولی در ۱۲۰۰۰ چرخهٔ بعدی می‌تواند دچار نشتی شود. کلیهٔ مخازنی که تحت این آزمون قرار می‌گیرند پس از اتمام آزمون باید از رده خارج شوند.

جدول ۷: آزمون‌های نمونه بر روی مخازن [۱۹].

نام آزمون	تعداد	نوع اول	نوع دوم	نوع سوم	نوع چهارم
مواد اولیه	یک مخزن (یک لایه داخلی کامپوزیت)	*	*	*	*
ترکیدن تحت فشار هیدرواستاتیک	یک لایه داخلی و سه مخزن	*	*	*	*
چرخهٔ فشار در دمای محیط	دو مخزن	*	*	*	*
نشت پیش از شکست	سه مخزن	*	*	*	*
قرار گرفتن در معرض آتش	یک یا دو مخزن	*	*	*	*
نفوذ گلوله	یک مخزن	*	*	*	*
محیط اسیدی	یک مخزن		*	*	*
تحمل خرابی	یک مخزن		*	*	*
خزش در دمای بالا	در صورت لزوم یک مخزن		*	*	*
تسریع گسیختگی ناشی از تنش	یک مخزن		*	*	*
چرخه فشار در دمای بالا و پایین	یک مخزن		*	*	*
استقامت برشی رزین	یک پولک نمایندهٔ پوشش کامپوزیت		*	*	*
سقوط	حداقل یک مخزن			*	*
گشتاور نافی برجسته	یک مخزن				*
نفوذپذیری	یک مخزن				*
چرخهٔ گاز طبیعی	یک مخزن				*

۹. آزمون خزش در دمای بالا: این آزمون برای تمام مخازن نوع ۲، ۳ و ۴ که دمای گذر شیشه‌ای‌شدن رزین تشکیل‌دهندهٔ کامپوزیتی آن‌ها از ۱۰۲ درجه سانتی‌گراد بیشتر نیست باید انجام گیرد. در این آزمون، مخزن در دمای ۱۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد به‌مدت ۲۰۰ ساعت تحت فشار ۲۶۰ bar قرار می‌گیرد. سپس تحت آزمون هیدرواستاتیک، آزمون نشت و آزمون ترکیدن با فشار هیدرواستاتیک قرار می‌گیرند که باید در همه آزمون‌ها قبول شود.

۱۰. آزمون تسریع گسیختگی ناشی از تنش: در این آزمون یک مخزن در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد تحت فشار هیدرواستاتیک ۲۶۰ bar قرار می‌گیرد. مخزن به‌مدت ۱۰۰۰ ساعت تحت این فشار نگه داشته می‌شود. سپس مطابق معمول، آزمون ترکیدن تحت فشار هیدرواستاتیک تا فشار ترکیدن روی آن انجام می‌شود با این تفاوت که این بار فشار ترکیدن باید از ۸۵ درصد حداقل فشار طراحی برای ترکیدن، فراتر رود.

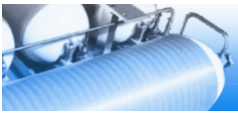
۱۱. آزمون چرخهٔ فشار در دمای بالا و پایین: در مرحلهٔ اول ابتدا مخزن را ۴۸ ساعت در فشار صفر نسبی، در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد یا بالاتر و در محیطی با رطوبت بیشتر از ۹۵ درصد قرار می‌دهند سپس در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۹۵ درصد، ۵۰۰ چرخه، مخزن را تحت فشار متناوب بین ۲۰ bar تا ۲۶۰ bar قرار می‌دهند. نرخ فشار سیکلی اعمال‌شده باید کمتر از ۱۰ سیکل در دقیقه باشد. در مرحلهٔ بعد مخزن در دمای ۴۰- درجهٔ سانتی‌گراد، ۵۰۰ برابر عمرکاری برحسب سال، تحت فشار متناوب بین ۲۰ bar تا ۲۰۰ bar قرار می‌گیرد. نرخ فشار سیکلی اعمال‌شده باید از ۳ سیکل در دقیقه کمتر باشد. با انجام مراحل فوق نباید هیچ‌گونه خرابی، نشتی یا جدایی الیاف به‌وجود بیاید. در مرحلهٔ دمای بالا مخزن تحت آزمون هیدرواستاتیک قرار می‌گیرد تا

خراب شود. حداقل فشار ترکیدن باید برابر ۸۵ درصد حداقل فشار ترکیدن طراحی باشد. درصورتی‌که مخازن از نوع ۴ باشند قبل از این‌که مخزن تحت آزمون ترکیدن هیدرواستاتیک قرار بگیرد باید آزمون نشت روی آن انجام شود.

۱۲. آزمون مقاومت برشی رزین: در این آزمون یک پولک نماینده پوشش کامپوزیت، طبق استاندارد معادل، تحت آزمون قرار می‌گیرد، پس از ۲۴ ساعت جوشاندن در آب، ماده کامپوزیت باید حداقل استقامت برشی ۱۳/۸ MPa را داشته باشد.

۱۳. آزمون سقوط: یک یا چند مخزن تکمیل‌شده بدون اعمال فشار داخلی و نصب شیر، در دمای محیط تحت آزمون قرار می‌گیرند. یک مخزن به‌صورت افقی از فاصله ۱/۸ متری از سطح رها می‌شود. یک مخزن به‌صورت عمودی به‌گونه‌ای رها می‌شود که انرژی پتانسیل آن ۴۸۸ ژول باشد، ولی در هیچ حالتی ارتفاع عدسی پایین مخزن نباید از ۱/۸ متر بیشتر باشد. یک مخزن نیز باید تحت زاویه ۴۵ درجه از ارتفاعی روی عدسی رها شود به‌طوری‌که فاصله مرکز گرانش آن از زمین ۱/۸ متر باشد. پس از این آزمون، مخزن در ۳۰۰۰ چرخه در دمای محیط تحت چرخهٔ فشار بین ۲۰ bar الی ۲۶۰ bar قرار گرفته و سپس تحت ۱۲۰۰۰ چرخهٔ دیگر قرار می‌گیرد. مخزن در ۳۰۰۰ چرخهٔ اول نباید دچار نشتی یا گسیختگی شود ولی در ۱۲۰۰۰ چرخهٔ بعدی می‌تواند فقط دچار نشتی شود.

۱۴. آزمون گشتاور نافی: بدنهٔ مخزن باید در برابر چرخش مهار شود و گشتاوری معادل با دو برابر گشتاور مشخص‌شده توسط سازنده برای نصب شیر یا وسیلهٔ اطمینان تخلیه فشار به هر نافی انتهایی مخزن وارد می‌شود. گشتاور ابتدا باید در جهت بستن اتصال رزوه‌ای و سپس درجهت باز کردن آن و نهایتاً دوباره درجهت بستن اعمال شود. سپس مخزن در معرض آزمون نشت قرار می‌گیرد.



۱۵. آزمون نفوذپذیری گاز: در این آزمون یک مخزن تکمیل‌شده با گاز طبیعی فشرده در فشار کاری پر می‌شود و در دمای محیط در یک اتاقک بسته قرار می‌گیرد. سپس به‌مدت ۵۰۰ ساعت از نظر نشتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. میزان نفوذپذیری نباید از ۰/۲۵ میلی‌لیتر گاز طبیعی بر ساعت در هر لیتر گنجایش آبی مخزن، فراتر رود. سپس مخزن برش زده شده و سطح داخلی آن از نظر وجود هرگونه نشانهٔ ترک یا خرابی، بازرسی می‌شود.

۱۶. آزمون چرخهٔ گاز طبیعی: در این آزمون باید ایمنی کافی رعایت شود. پیش از این آزمون طراحی، مخزن باید آزمون‌های نشت، ترکیدن تحت فشار هیدرواستاتیک، چرخهٔ فشار در دمای محیط و نفوذپذیری را با موفقیت پشت‌سر گذاشته باشد. در این آزمون یک مخزن با اعمال فشار با گاز طبیعی، بین کمتر از ۲۰ bar الی فشار کاری، تحت ۱۰۰۰ چرخه قرار می‌گیرد. مدت زمان پرشدن مخزن باید حداکثر ۵ دقیقه باشد. سپس مخزن تحت آزمون نشت قرار می‌گیرد و پس از تکمیل آزمون‌ها مخزن برش زده شده و از نظر وجود هرگونه نشانهٔ خرابی نظیر ترک‌خوردگی ناشی از خستگی یا تخلیهٔ الکترواستاتیکی مورد بازرسی قرار می‌گیرد.

۱۰ بازرسی

به‌طور کلی خودروها تحت بازرسی‌های ایمنی ادواری قرار می‌گیرند. به‌عنوان مثال رانندگان؛ تایرها، ترمزها و چراغ‌های خودروهایشان را برای اطمینان از درستی کارکرد مورد بازرسی‌های ادواری قرار می‌دهند. مخزن خودروهای CNGسوز نیز باید به‌صورت ادواری برای حصول

اطمینان از نحوهٔ کارکرد درست مخزن، تحت یک بازرسی کلی و دقیق قرار گیرد. بازرسی‌های ادواری مخازن CNG می‌بایست مطابق با یک استاندارد ملی یا بین‌المللی انجام پذیرد.

۱۰-۱ نحوهٔ انجام بازرسی

با توجه به استانداردهای مختلف موجود برای مخازن خودروهای CNGسوز، مخازن این خودروها تحت دو بازرسی ادواری چشمی و ویژه قرار می‌گیرند. مخازن سوخت CNG دست‌کم پس از هر ۳۶ ماه یا بعد از طی مسافت ۳۶۰۰۰ مایل (هرکدام که زودتر اتفاق بیافتد) می‌بایست برای بررسی آسیب یا خرابی تحت بازرسی چشمی قرار بگیرند. یک بازرس کارآزموده جهت انجام بازرسی چشمی به ضربه‌ها، ترک‌ها و شکاف‌ها، شیارها، خراشیدگی‌ها، تغییر رنگ، الیاف آسیب‌دیده، بست‌های لق‌شده، واشرها یا بست‌های آسیب‌دیده، آسیب‌های حرارتی یا سایر آسیب‌ها توجه کرده و توصیه‌هایی را جهت انجام اقدام مناسب برای اطمینان و تضمین ایمنی ارائه می‌دهد.

علاوه بر بازرسی متعارف ۳۶ ماهه یا ۳۶۰۰۰ مایلی بالا، اگر خودرو دچار تصادف شود می‌بایست مخزن‌های CNG را تحت یک آزمایش چشمی دقیق جهت بررسی آسیب‌ها یا خرابی‌های احتمالی قرار داد. تقریباً همهٔ مخازن خودروهای CNGسوز که در حال حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرند از استاندارد ایمنی خودروهای موتوری فدرال ۳۰۴ (یکپارچگی مخزن سوخت گاز طبیعی فشرده) یا استاندارد صنعتی خودروی گازسوز NSI/IAS NGV2 (احتیاجات اساسی مخازن سوخت گاز طبیعی فشرده خودروها) پیروی می‌کنند.

هر دوی این استانداردها یک آزمایش ادواری چشمی را برای هر سه سال تعیین می‌کنند. علاوه بر این NGV2 قید کرده‌است که بازرسی براساس آئین‌نامه‌های موجود در جزوه C-6.4 انجمن گاز فشرده (روش‌های بازرسی چشمی خارجی مخازن سوخت گاز طبیعی فشرده خودروها و نصب آن‌ها) و توصیه‌های سازندگان مخزن ادامه پیدا کند. البته مخزن تا زمانی‌که هیچ‌گونه آسیب یا خرابی در سطح بدون حفاظ آن دیده نشود، از محلش خارج نخواهد شد. جزوه C-6.4 احتیاجات بازرسی و ضوابط مربوط به عدم پذیرش را به‌صورت مشروح معین کرده‌است.

در بازرسی‌های ویژه از یک روش غیرمخرب برای بازرسی و بررسی وضعیت مخزن استفاده می‌شود. دو روش از روش‌های غیرمخرب که عموماً جهت بازرسی ویژهٔ مخازن CNG به‌کار می‌روند، عبارتند از:

۱. بازرسی هیدرواستاتیک:

جهت انجام بازرسی هیدرواستاتیک، مخازن توسط آب پر شده و در ۱/۵ برابر فشار کاری تحت آزمایش قرار می‌گیرد، در چنین حالتی نباید هیچ‌گونه نشتی از مخزن مشاهده شود.

۲. بازرسی با استفاده از انتشار امواج صوتی:

در برخی موارد می‌توان از آزمون آکوستیک که در آن مخزن از خودرو جدا نمی‌گردد، استفاده کرد. به‌منظور دستیابی به اطمینان کامل از آزمون آکوستیک معمولاً فشار درون مخزن را با فشاری کمی بیشتر از فشار کاری پر می‌کنند. در برخی از طراحی‌های مخزن، چندین فشار پرشدگی به‌منظور بازرسی AE[۴۰]، نیاز است. همچنین در طراحی برخی از مخازن به تعداد زیادی از حسگرهای AE برای مانیتورینگ تمامی سطح مخزن احتیاج است.

[40] - Acoustic Emission

به‌طور معمول در خودروهای گازسوز، مخازن خودرو پرهزینه‌ترین قسمت آن‌را تشکیل می‌دهند. اخیراً هزینهٔ اضافی دیگری شامل آزمون هیدرواستاتیکی مخازن در هر سه یا پنج سال به هزینهٔ خودروهای گازسوز نیز اضافه شده‌است. در تست هیدرواستاتیکی نیاز است که مخزن ابتدا از روی خودرو برداشته شده و پس از آزمون دوباره روی خودرو نصب گردد.

مخازن NGV برای عمر محدود ۱۵ تا ۲۰ سال طراحی و ساخته می‌شوند. بازرسی‌های کارخانه‌ای که در استانداردهای مخازن مطرح شده‌اند به ما اجازه می‌دهد که در عمر طراحی مخازن، آزمون مجدد هیدرواستاتیک را روی آن‌ها انجام ندهیم. مخازن باید هر ۳۶ ماه یک بار برای آسیب‌های خارجی به‌طور چشمی مورد بازرسی قرار گیرند.

برخی از استفاده‌کنندگان تمایل به دسترسی اطلاعات دقیق‌تر و بیشتری از ساختار صحیح مخازن در حال سرویس، دارند. یکی از این نمونه تکنیک‌ها می‌تواند مانیتورینگ پاسخ به آزمون آکوستیک مخازن باشد.

آزمون آکوستیک به میزان انرژی مکانیکی آزاد شده از طرف ماده یا قسمتی که تحت تنش قرار گرفته است، اشاره دارد. هنگامی‌که تنش اعمال شده به اندازهٔ کافی بزرگ باشد کسری از انرژی مکانیکی ساطع شده به‌صورت موج آکوستیک در خواهد آمد. رشد ترک‌ها و درزها یا دیگر پدیده‌ها، تمرکز تنش را در جسم کاهش خواهد داد. به‌طور معمول از یک ترنسدیوسر پیزوالکتریک[۴۱] به‌منظور تبدیل انرژی مکانیکی به سیگنال الکتریکی جهت آزمایش طبیعت موج آکوستیک منتشر شده، استفاده می‌شود. در حالت ایده‌آل هدف از بازرسی آکوستیکی می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

۱. آزمون باید بدون برداشتن مخزن از خودرو انجام گیرد.

[41] - Piezo-electric Transducer

۲. آزمون باید در طول مدت یک پرشدگی منفرد گاز طبیعی تا فشار کاری انجام گیرد.

۳. حسگرهای AE را باید در محل‌های بدون حفاظ مخزن جاگذاری نمود.

۴. معیارهای آزمون باید شامل موارد زیر باشد:

- آیا مخزن صدمه دیده می‌باشد؟
- نوع صدمهٔ مخزن باید از لحاظ ضربه‌ای، مکانیکی، شیمیایی یا گرمایی مشخص گردد.
- آیا مخزن عملکرد نشت پیش از شکست (LBB) را دارد یا خیر؟
- آیا مخزن قبل از بازرسی بعدی ازکار افتاده خواهد شد؟

۵. معیارهای آزمون باید برای انواع مختلف طراحی آزمون معتبر باشد.

۶. آزمون باید مخازنی تا طول ۳ متر را نیز تحت پوشش قرار دهد.

برخی از تحقیقات نشان می‌دهند که آزمون آکوستیک روی مخازن NGV می‌تواند نقاط صدمه‌دیده را پیدا نماید. به هر حال در حال حاضر، اطلاعات کمی به‌منظور مرتبط ساختن نتایج آزمون آکوستیک و بی‌نقصی ساختاری مخزن، موجود است. بعلاوه مقرر نمودن یک سیگنال معیار در آزمون آکوستیک که برای همهٔ انواع طراحی مخازن معتبر باشد، بسیار دشوار است. یک کمیته در ایالات متحده استاندارد زیر را برای انجام مراحل مختلف آزمون آکوستیک و مواد به‌کار رفته، ارائه داده‌است.

“Standard Test Method for Examination of Gas-Filled Filament Wound Composite Pressure Vessel Using Acoustic Emission”

در این استاندارد یک معیار پذیرفته‌شده براساس محاسبات و تجربیات برای انواع مخازن کامپوزیتی، ارائه گردیده است. در جدول ۸ شرح برخی از مزایای روش AE در مقایسه با روش‌های متداول دیگر فهرست شده‌است.

جدول ۸: مقایسه مزایای روش AE با روش‌های هیدرولیک و اولتراسونیک [۲۴].

روش AE	سایر روشها
نیازی به جدا کردن مخزن از خودرو ندارد.	در آزمون‌های هیدرولیک و اولتراسونیک، مخزن باید از خودرو جدا شود.
حداکثر فشار کاری مورد نیاز، ۱۱۰ درصد فشار کاری می‌باشد که مشکلی در عملکرد مخزن به‌وجود نمی‌آورد.	هیدرولیک؛ اگر فشار هیدرواستاتیک به حدود ۱۶۷درصد حداکثر فشار مجاز کاری برسد، احتمال تغییر شکل دائم درقطعه وجود دارد.
نیازی به تخلیه یا تغییر سیال داخل مخزن نیست.	هیدرولیک؛ باید محتویات مخزن خالی شده و با سیال دیگری پر شود و مجدداً خالی و تمیز شود که این سبب ورود ناخالصی‌ها و رطوبت به سیستم و افزایش احتمال خوردگی می‌شود.
موقعیت و اندازهٔ همه عیوب و ترک‌ها شناسایی می‌شوند.	هیدرولیک؛ ممکن است عیوب نیمه‌بحرانی و حتی بحرانی شناسایی نشوند.
کل قطعه را می‌توان از چند نقطه آن بازرسی نمود و نیازی به در دسترس بودن همه سطح نیست، به‌همین علت هزینه پایین می‌آید.	اولتراسونیک؛ باید کل سطح مخزن در دسترس باشد.
قطعات را می‌توان حین کار بازرسی نمود.	هیدرولیک و اولتراسونیک؛ حتماً باید سیستم خاموش شود.
فقط درچند نقطهٔ پوشش زدوده می‌شود.	اولتراسونیک؛ باید همه پوشش مخزن زدوده شود.
می‌توان داده‌های آزمون را به صورت الکترونیکی نگهداری کرد و برای بازرسی‌های بعدی از آن استفاده نمود.	هیدرولیک؛ اطلاعات تکمیلی به ما نمی‌دهد.

۱۰-۲ ویژگی‌های بازرس

بازرسی مخزن سوخت یک خودروی گازسوز می‌بایست توسط یک بازرس کارآزموده انجام پذیرد. یک بازرس کارآزموده می‌بایست دارای شرایط زیر باشد:

- دارای حداقل دو سال تجربه در اجرای بازرسی‌های مخازن باشد.
- تحت نظارت فردی با دو سال تجربه، کار کرده باشد.
- توسط تولیدکننده مخزن مورد تأیید قرار گرفته باشد یا تحت نظارت یک مرجع دارای صلاحیت، دوره و آموزش دیده باشد.

علاوه بر موارد بالا بازرس مذکور باید دارای شرایط زیر نیز باشد:

- آگاهی‌داشتن از انواع مخازن به‌کار رفته در خودروهای CNG و محدودهٔ مجاز خرابی‌ها برای هر نوع از آنها
- اطلاع از الزامات بازرسی، آزمون‌ها، رویه‌های انجام بازرسی
- اطلاع از توصیه‌های کنونی سازندهٔ مخزن در رابطه با بازرسی مخزن

۱۱ مکانیزم‌های آسیب

بیشترین هزینه در تبدیل خودروها به‌سیستم گازسوز، مربوط به‌طراحی و ساخت مخازن است. درنتیجه لازم است که در ساخت و طراحی مخازن CNG انواع آسیب‌های وارده به‌مخازن را مورد بررسی قرار دهیم و تا آنجاکه ممکن است به‌روش‌های مختلف از بروز آن‌ها جلوگیری به‌عمل آوریم. این مخازن تحت عملیات و فرآیندهای ساخت مختلفی قرار می‌گیرند و همین امر ممکن است سبب بروز آسیب‌هایی در مخازن شود. بنابراین برای به‌حداقل رساندن این

آسیب‌ها می‌بایست شرایط طراحی و ساخت با شرایط ذکرشده در استانداردهای مخازن CNG هماهنگی کاملی داشته باشد. برای شناسایی آسیب‌ها، مخازن را در معرض آزمون‌های ذکرشده در استانداردها قرار می‌دهند تعدادی از آسیب‌های وارده به‌مخازن عبارتند از: آسیب‌های ناشی از خوردگی (خوردگی ناشی از رطوبت، نمک، گرد و خاک و باران اسیدی)، حملات محیطی، سایش، ضربه، تنش حرارتی، کاهش مقاومت الیاف پیچشی، کاهش چقرمگی مخزن و غیره. البته میزان آسیب وارده به مخازن، به طراحی مخازن و شرایط کاری آن‌ها نیز بستگی دارد و در هر کدام از انواع مخازن احتمال بروز آسیب‌ها فرق می‌کند. مثلاً مخازن نوع ۲ با پوشش الیاف شیشه‌ای مستعد در برابر تنش خوردگی هستند. بنابراین تا آنجاکه ممکن است نباید در معرض محیط‌های اسیدی قرار بگیرند و همچنین مخازن آلومینیومی نسبت به‌مخازن فولادی در برابر خوردگی آسیب پذیرترند و آلیاژهای آلومینیوم عکس‌العمل‌های الکتروشیمیایی بیشتری در مقایسه با فولاد دارند و آمادگی بیشتری برای خوردگی گالوانیک هنگامی‌که در تماس با سایر فلزات هستند از خود نشان می‌دهند. مخازن نوع ۳ و ۴ یعنی مخازن با پیچش کامل، در برابر سایش و ضربه مستعد هستند. بنابراین می‌بایست تعداد بازرسی‌ها را افزایش داد یا به شیوه‌های مختلف مثلاً به‌کارگیری پوشش‌هایی شامل رنگ‌های محافظ، احتمال بروز آسیب را کاهش داد. ذکر این نکته ضروری است که استانداردها و آزمون‌ها بیان‌کنندهٔ حداقل شرایطی هستند که یک مخزن می‌بایست دارا باشد و این تکنولوژی ساخت و کیفیت محصول است که می‌تواند آسیب‌های موجود را کنترل کرده و به‌حداقل برساند. در زیر به‌تعدادی از آسیب‌های موجود در مخازن اشاره می‌شود.

۱۱-۱ آسیب‌های معمول در مخازن ذخیرهٔ گاز طبیعی

آسیب‌های وارده به‌مخازن شامل آسیب‌های آستری در هنگام شکل‌دهی و مراحل بعد از آن و آسیب‌های وارده به پوشش کامپوزیتی می‌باشند. البته در کنار آسیب‌های قابل رویت، آسیب‌هایی هم که با چشم غیرمسلح قابل رویت نیستند، باید درنظر گرفته شوند.

۱۱-۱-۱ به‌وجود آمدن آسیب درهنگام شکل‌دهی آستر

آستر اغلب مخازن CNG از فلزاتی نظیر فولاد و آلیاژهای آلومینیوم ساخته می‌شود و این فلزات لوله‌هایی هستند که تحت عملیات شکل‌دهی گرم و ماشین‌کاری سطحی و عملیات حرارتی سردکردن سریع برای ایجاد یک سطح سخت قرار می‌گیرند و در حین انجام این عملیات امکان ایجاد ترک زیاد است، البته به‌علت خوردگی محلی و عیوب ساختاری نیز ترک‌هایی در سطح مخزن ظاهر می‌شود. برای تشخیص این ترک‌ها از روش‌هایی مانند گاما، اولتراسونیک و انتشار آکوستیک (AE) استفاده می‌شود و برای کاهش این ترک‌ها از روش‌هایی نظیر نرمالایزینگ و بازپخت استفاده می‌کنند. آستر مخازن سوخت تمام کامپوزیتی ترکیبی از پلی‌اتیلن با چگالی بالا می‌باشد. این ترکیب پلی‌اتیلن دارای استحکام بالایی بوده و برای ایجاد کرنش هماهنگ بین آستری و کامپوزیت از لایه‌های نازک لاستیکی استفاده می‌شود، این عمل به‌روش تزریق انجام می‌گیرد. البته در صورتی‌که اتصال دقیق و مناسبی بین آستری و کامپوزیت وجود نداشته باشد امکان بروز آسیب‌هایی در آستری وجود دارد.

۱۱-۱-۲ آسیب در هنگام ایجاد پوشش کامپوزیت

در حال حاضر معیار آسیب مواد کامپوزیتی، با توجه به سطح محدود اطلاعات قابل‌فهم نیست. ارائهٔ یک معیار آسیب، به‌عنوان مناسب‌ترین معیار در شرایط کلی غیرممکن است. در حالت

کلی پوشش کامپوزیتی مخازن تحت عملیات الیاف‌پیچی به‌وجود می‌آید و برای جلوگیری از تاخوردن الیاف در مرحله پیچش این الیاف تحت عملیات کشش قرار می‌گیرند. تعدادی از آسیب‌هایی که در پوشش‌های کامپوزیتی با آن‌ها مواجه می‌شویم شامل جدایی الیاف و رزین، جدایی بین‌لایه‌ای الیاف، جدایی آستر و کامپوزیت، ترک خوردن رزین و آسیب ناشی از جابجایی مخازن هستند. برای پیش‌گیری از آسیب‌ها و برای توسعهٔ جایگاه قوانین مربوط به تولیدات جدید براساس معیار آسیب ترکیبات کامپوزیتی، دو نکته می‌بایست درنظر گرفته شود.

۱. باید مطالعات میکرومکانیکی انجام شود. در حال حاضر اطلاعاتی که ارائه می‌شوند مفاهیم مربوط به پنج مکانیسم شکست مختلف هستند. این پنج مکانیسم عبارتند از: شکست الیاف در وضعیت کشش[۴۲](FBT)، شکست الیاف در وضعیت فشردگی[۴۳](FBC)، جدایی ماتریس و الیاف[۴۴](FMS)، ماتریس در وضعیت کشش[۴۵](MT)، ماتریس در وضعیت فشردگی[۴۶](MC).

۲. باید مطالعات آزمایشی روی الیاف انجام شود به‌همین منظور مجموعه‌ای از آزمون‌ها براساس نتایج میکرومکانیکی طراحی می‌شوند. آزمون‌های مذکور برای تأیید این نتایج و چگونگی بسط این نتایج میکرومکانیکی به لایه‌های واقعی کامپوزیت، انجام می‌شود.

---

42 - Fiber Breakage in Tension
43 - Fiber Breakage in Compression
44 - Fiber Matrix Shearing
45 - Matrix in Tension
46 - Matrix in Compression

البته در این لایه‌ها به‌دلیل مشکلات درگیر با معیار آسیب لایه‌ها، با مشکلات پیچیده‌ای روبرو هستیم و تا زمانی‌که به یک معیار آسیب ثابت نرسیم به سؤالات در این زمینه نمی‌توان پاسخ قطعی داد.

۱۲ اطلاعات مربوط به علامت‌گذاری مخزن

بر روی مخازن باید اطلاعاتی برای آگاهی حک گردد، این اطلاعات به‌صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱. اطلاعات ضروری

الف- استاندارد ساخت مخازن، برای مثال

Compressed Natural Gas Container Integrity، FMVSS 304

ب- علامت NGV2-XX (XX سال تدوین استانداردی است که مخزن براساس آن طراحی می‌شود).

پ – شمارهٔ شناسایی مخزن (شمارهٔ سریال مخزن)

ت – روی برچسب باید عبارت "فقط از شیر تخلیهٔ فشاری که توسط سازنده تأیید شده، استفاده نمایید." نوشته شود.

۲. اطلاعات اختیاری: اطلاعات جانبی و غیرضروری دیگر می‌تواند به موارد فوق اضافه گردد ولی باید دقت کرد که شبهه‌ای در مورد اطلاعات اجباری روی برچسب، ایجاد نگردد. این اطلاعات همیشه باید پس از اطلاعات اجباری آورده شوند.

علامت‌گذاری اختیاری مخزن می‌تواند به‌ترتیب زیر آورده شود.

- مخزن تنها برای CNG مورد استفاده قرار گیرد.
- بعد از تاریخ XXXX/XX استفاده نشود (XXXX نشان دهندهٔ سال و XX نشان دهندهٔ ماه می‌باشند).
- نام کارخانه سازنده مشخص باشد (مثل mcs).
- شماره ردیف (سریال) مشخص باشد.
- فشار کاری مخزن در دمای معین، مشخص باشد.
- تاریخ آزمون مخزن برحسب ماه و سال میلادی مشخص باشد.
- وزن خالی مخزن مشخص باشد.
- مهر بازرس مخازن یا فردی که دارای صلاحیت است، مشخص باشد.
- تاریخ ادواری (هر سه سال) بایستی مشخص باشد.
- ظرفیت آبی مخزن برحسب لیتر معین باشد (برای مثال ۱۲۰ lit).
- میزان فشار در آزمون فشار مشخص باشد.

۱۳ فناوری‌های جدید در مخازن CNG

۱-۱۳ سیستم ذخیره‌سازی ISS

سیستم ذخیره‌سازی گاز یکپارچه[۴۷](ISS) برای مخازن تمام کامپوزیت و مخازنی با قطر کوچک توسعه داده شده‌است. در این سیستم، مخازن توسط یک پوستهٔ الیاف شیشه‌ای با استحکام بالا و فوم جاذب ضربه، پوشش داده می‌شوند. ساختار سیستم شامل سلول‌های فشاری

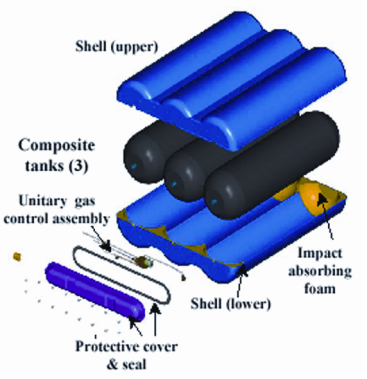
[47] - Integrated Storage System

است که پوششی از ترکیب کربن، شیشه و اپوکسی دارند و یک فوم جاذب شوک و ضربه به‌همراه یک پوستهٔ شیشه‌ای آن‌را دربر گرفته‌است. ضخامت پوشش الیاف دیواره سلول‌های فشار برای جانمایی در اتومبیل بهینه شده‌اند و حفاظت از آن‌ها توسط قسمت‌های ISS فراهم می‌شود. پوستهٔ خارجی ISS با فوم جاذب شوک و ضربه در ارتباط است و سلول‌های فشاری را یکپارچه می‌سازد. این پوستهٔ خارجی سلول‌های فشاری را در مقابل بارهای محلی، بارهای کلی و اثرات محیطی محافظت می‌کند. نمونه‌ای از این سیستم در شکل ۱۱ نشان داده شده‌است.

سیستم ISS به‌عنوان یک مخزن واحد عمل کرده و دارای یک شیر قطع دستی، یک شیر سولونوئیدی برقی همراه با یک PRD[۴۸] (این شیر به‌صورت حرارتی عمل می‌کند) است. همگی این اجزا در سیستم واحد قرار دارند. در صورت عدم استفاده از سیستم ISS و به‌کارگیری چند مخزن جداگانه براساس استانداردهای ایمنی مجبور هستیم تعداد اجزاء را افزایش دهیم و درنتیجه هزینه افزایش می‌یابد.

سیستم لوله‌کشی ISS به‌طور کامل توسط یک فوم، از آسیب‌ها ایمن شده‌است و این فوم دارای یک پوشش محافظ از الیاف شیشه‌ای است که در هنگام تعمیرات می‌توان آن‌را جابه‌جا کرد. این سیستم حفاظتی نقش دوگانه‌ای را ایفا می‌کند. این سیستم علاوه بر حفاظت، گاز نشتی از مخازن و شیرآلات را به یک ناحیهٔ امن در زیر بدنهٔ خودرو انتقال می‌دهد. سیستم ISS توسط یک تسمهٔ فولادی به بدنهٔ خودرو متصل می‌شود.

[48] - Pressure Relief Device



شکل ۱۱: سیستم ذخیره‌سازی ISS

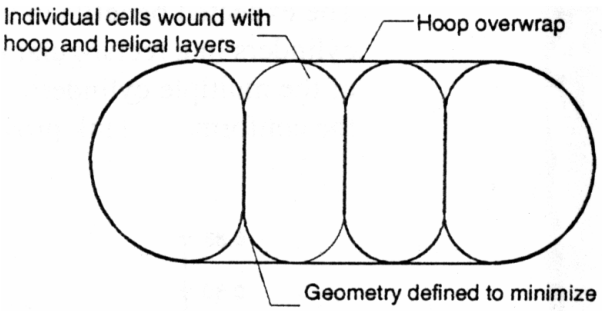
۲-۱۳ مخازن تطابق‌پذیر

یکی از جدیدترین فناوری‌های شرکت ATK Thiokol Propulsion تولید مخازن نوع ۴ تطابق‌پذیر[۴۹]، می‌باشد. این مخازن به‌صورت دوقلو یا سه‌قلو ساخته می‌شوند. در ابتدا مخازن به‌صورت منفرد ساخته می‌شوند و به‌صورت محیطی و محوری توسط الیاف پیچیده می‌شوند سپس این مخازن به‌صورت دوقلو یا سه‌قلو به‌صورت محیطی به یکدیگر متصل می‌شوند. در شکل ۱۲ این سیستم از مخازن با اجزای آن نشان داده شده‌است. مخازن کامپوزیتی الیاف کربن با استحکام بالا به‌همراه آسترهای پلاستیکی، مخازن کم‌وزن با نفوذپذیری پایین را برای نصب روی خودرو نتیجه می‌دهند. البته به‌طور همزمان مخازن ذخیرهٔ تطابق‌پذیر، نتایجی را به‌همراه راندمان بالاتر در هنگام جانمایی روی خودرو ارائه می‌کنند. مخازن تطابق‌پذیر ظرفیتی بالاتر از ۵۰٪ ظرفیت مخازن موجود را می‌توانند فراهم کنند که با مخازن استوانه‌ای متداول

[49] - Conformable

قابل رقابت هستند. با ترکیب طراحی چندسلولی منحصربه‌فرد به‌همراه روش‌های ترکیبی توسعه‌یافته، مخازن تطابق‌پذیر به‌عنوان مخازن جایگزین پیشنهاد می‌شوند. شکل ۱۳ یک نمونه از سیستم مخازن تطابق‌پذیر ساخته‌شده توسط شرکت THIOKOL را نشان می‌دهد.

طراحی، تحلیل، بهینه‌سازی مواد و فرآیندها و ساخت و آزمون مخازن جهت اطمینان از توانایی تجهیزات فشاربالا و به حداقل رساندن هزینه‌ها و الزامات مواد به‌کار رفته، انجام می‌گیرند. آخرین ایمنی‌ها و استانداردهای کارایی موجود برای این سیستم مخازن فشاربالا به‌منظور نصب روی خودرو و برای اطمینان از عملکرد آن در طول عمر طراحی مخازن (حدود ۱۵ تا ۲۰ سال) به‌کار برده می‌شوند. سیکل‌های فشار، آزمون حداکثر دما و آزمون تلرانس آسیب روی سیستم‌های ذخیره با مقیاس واقعی پیاده می‌شوند.



شکل ۱۲: سیستم ذخیره‌سازی با راندمان حجمی بالا [۱۵].

شکل ۱۳: سیستم ذخیره‌سازی با راندمان حجمی و فشار کاری بالا [۱۵].

۳-۱۳ مخازن با قطر بزرگتر

صنایع Dynetek سازندهٔ مخازن تمام‌پیچ با الیاف کربنی و آستری آلومینیومی با حداکثر قطر ۴۰۶ mm، طراحی مخازن موجود خود را برای دستیابی به مخازنی با قیمت ساخت کمتر، بهبود عمر کاری و مقاومت به ضربه بهتر، بهینه کرده‌است. کاهش هزینهٔ ساخت مخازن با استفاده از جایگزینی لوله‌های آلومینیومی بدون‌درز AA6061 مورد استفاده در ساخت آستری، با ورق‌های آلومینیومی حاصل شد. همچنین در ساخت آستری از ورق آلومینیومی امکان ساخت مخازن با قطر بزرگتر (۵۲۰ mm) به‌وجود آمد. این افزایش قطر، راندمان حجمی مخزن را نیز افزایش می‌دهد و بنابراین هزینه بر واحد حجم گاز ذخیره‌شده نیز افزایش می‌یابد. ورق آستری‌ها می‌بایست معیارهایی از قبیل استحکام بالا، سختی پایین، وزن کم، مقاومت در مقابل زنگ‌زدگی، قابلیت تغییرشکل آسان، مقاومت در مقابل دما، هزینه کم و قابلیت در دسترس بودن را داشته باشد.

عملکرد این مخازن با انجام عملیات حرارتی مناسب افزایش می‌یابد. این عملیات حرارتی استحکام آستری را بهبود می‌بخشد و مقاومت در مقابل خستگی را افزایش می‌دهد. استفاده از الیاف کربنی با عملکرد بالا باعث افزایش ۵۰ درصدی در فشار ترکیدن و افزایش ۲۰۰ درصدی در عمر سیکلی مخزن می‌شود. بهینه‌سازی قسمت عدسی‌شکل آستری و الگوی الیاف‌پیچی کامپوزیتی که با استحکام بالای آستری و الیاف کربنی قوی‌تر همراه هستند، باعث افزایش ۱۰۰ درصدی عمر سیکلی مخازن بعد از آزمون سقوط می‌شود. آزمون‌های انجام‌شده روی این مخازن برای تأیید طراحی شامل موارد زیر می‌باشند:

۱. آزمون چرخهٔ فشار محیطی

۲. آزمون محیطی

۳. آزمون فشار ترکیدن

۴. آزمون تلرانس آسیب

۵. آزمون سقوط

۶. آزمون قرار گرفتن در معرض آتش

۷. آزمون تسریع گسیختگی تحت تنش

۸. آزمون نفوذپذیری گاز

۴-۱۳ طراحی نوع خاصی از مخزن CNG ساخته‌شده از جنس آلومینیوم و پلاستیک تقویت‌شده

در این بخش ساخت نوعی خاص از مخازن ذخیره‌سازی CNG از جنس آستر آلومینیومی نازک با تقویت‌کنندهٔ شیشه- گزوکسی[۵۰] معرفی می‌شود. در طراحی این نوع مخازن برای مشخص نمودن ابعاد مخزن و مشخصات فیزیکی آن (بهینه‌کردن مخزن) روابط مورد نظر با روش‌های کامپیوتری حل شده‌اند. سپس آزمون‌های لازم روی مخازن نمونهٔ ساخته‌شده، انجام گرفته و این مخازن توانسته‌اند پاسخگوی شرایط مورد نظر باشند. از جمله مزایای این نوع مخزن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

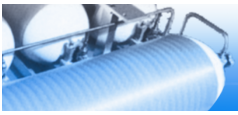
- مواد مهندسی به‌کاررفته در ساختار این مخازن ارزان هستند و قابلیت ماشین‌کاری خوبی دارند که مقاومت زیاد و ظرفیت تنش بالایی را به مخزن می‌دهند.

[50] - Thin-Walled Aluminum Liners with a Glass/ Gzoxy Reinforcement

- ظرفیت تحمل بار استاتیکی بالا و دورهٔ عمر طولانی از نتایج بهینه‌کردن ضخامت جداره و سختی پوستهٔ کامپوزیتی و پیش‌فشردگی مناسب در مخزن می‌باشد.
- از جمله مزایای خاص ساختار جدید، این است که می‌توان مخازن قدیمی را براحتی به بخش‌های تشکیل‌دهندهٔ آن‌ها تقسیم کرد و برش داد و مواد مهندسی به‌کار گرفته شده را به‌طور جداگانه داشت.
- با توجه به ساختار مخازن تولیدشده به‌صورت انبوه و آزمایش‌های انجام گرفته، مشخص شده‌است که می‌توان ضخامت جدارهٔ آلومینیومی را کاهش داد تا باعث کاهش طول درز جوش‌ها و بهبود کیفیت آن‌ها گردد. درنتیجه جرم ویژه و نیز قیمت آن و قیمت مخزن کاهش خواهد یافت.

از جمله ویژگی‌های این طراحی، استفاده از کامپیوتر، نرم‌افزار CAD و برنامه‌های کامپیوتری در فرآیند بهینه‌کردن و تحلیل است که کار را ساده‌تر و مطمئن‌تر خواهند نمود. پس از طراحی اولیه و به‌دست آوردن پایه طراحی، مخازن نمونه ساخته شده و تست‌ها با اهداف زیر انجام می‌گیرند:

۱. اثبات قابل‌اعتماد بودن روش به‌کار گرفته‌شده در طراحی
۲. به‌دست آوردن مزایای ساختار انتخاب‌شده و اثبات آن‌ها
۳. تکمیل کردن ساختار نمونه



مراجع

[1] http://www.faber-italy.com

[2] http://www.bcresearch.com/catf/review/issue_28

[3] http://www.ngv.org/ngv

[4] http://www.addax.com/technology/filament_winding.html

[5] Aceves, S., M., Martinez-Frias, J., Espinosa-Loza, F., Schaffer, R., Williams, J., "Certification Testing and Demonstration of Insulated Pressure Vessels for Vehicular Hydrogen and Natural Gas Storage," 8th International Conference and Exhibition on Natural Gas Vehicles, Washington D.C., October 8-10, 2002.

[6] Dick, W., E., and Eihusen, J. A., "New Developments in Compressed Natural Gas Storage Systems for Heavy Duty Vehicles," 8th International Conference and Exhibition on Natural Gas Vehicles, Washington D.C., October 8-10, 2002.

[7] Jinfu, C., Mei, Q., Wendong, X., Shaoxin, L., "Adsorbent of Storage Natural Gas & its Use in ANGV," 8th International Conference and Exhibition on Natural Gas Vehicles, Washington D.C., October 8-10, 2002.

[8] Gifford, M., T., Stephens, D., R., Lautman, L., A., "Introduction to the Reference Guide for Integration of Natural Gas Vehicle Fuel Systems," 8th International Conference and Exhibition on Natural Gas Vehicles, Washington D.C., October 8-10, 2002.

[9] Newhouse, N., L., Dick, W., E., Sheridan, M., P., "Safety and Durability of NGV Fuel Storage Systems," 8th International Conference and Exhibition on Natural Gas Vehicles, Washington D.C., October 8-10, 2002.

[10] Zhou, L., Sun, Y., Zhou, Y., “The Experimental Prove of Storing Natural Gas on Wet Actived Carbon,” 8th International Conference and Exhibition on Natural Gas Vehicles, Washington D.C., October 8-10, 2002.

[11] Usoshim, V., Semeniuga, V., Orgenergogas, L., P., “Regulations as a Means to Improve NGV Cylinder Safety and Reliability,” 8th International Conference and Exhibition on Natural Gas Vehicles, Washington D.C., October 8-10, 2002.

[12] Vardga, L., Nagy, A., Kovacs, A., “Design of CNG tank made of Aluminum and Reinforced Plastic,” Composites, Vol. 26, Issue 6, 457-463, 1995.

[13] Parker, J., K., “CNG Tank Design for Personal Vehicle,” Presentation, Department of Mechanical Engineering, The University of Alabama.

[14] Gambone, L., R., Lautmanm, L., A., Rutzm, R., Taira, T., “The Development of a Large Diameter NGV Type 3 Cylinder from Aluminum Plate,” 7th International Conference and Exhibition on Natural Gas Vehicles, Yokohama, Japan, October 17-19, 2000.

[15] Haaland, A., C., and Kunz, R., C., “Conformable CNG Tanks for Increased Vehicle Range,” 7th International Conference and Exhibition on Natural Gas Vehicles, Yokohama, Japan, October 17-19, 2000.

[16] Wozniak, J., J., Wienhold, P., Hilderbrand, R., “Advanced Natural Gas Vehicle Development,” 7th International Conference and Exhibition on Natural Gas Vehicle, Yokohama, Japan, October 17-19, 2000.

[17] Liss, W., E., Fiore, V., B., Richards, M., E., “Driving Cylinder Costs and Weight down through Innovations,” 6th International Conference and Exhibition on Natural Gas Vehicle, Cologne, May 26-28, 1998.

[18] Wong, J., Y., and Liss, W., E., “Overview of Acoustic Emission Techniques for the Inspection of NGV Cylinder,” 6th International Conference and Exhibition on Natural Gas Vehicle, Cologne, May 26-28, 1998.

[۱۹] *مخازن CNG مخصوص نصب بر سروی خودرو*، بروشور سازمان بهینه‌سازی مصرف سوخت کشور، ۱۳۸۱.

[۲۰] *مخازن گاز- مخازن تحت فشار بالا، برای ذخیرهٔ گاز طبیعی به‌عنوان سوخت بر روی خودرو*، استاندارد ملی ایران ۶۳۰۶، چاپ اول، آذرماه ۱۳۸۱.

[۲۱] زارع بغداد آبادی، حمید، *طراحی مخازن تحت فشار*، مرکز گسترش فناوری اطلاعات، مؤسسه فرهنگی انتشاراتی آیه، ۱۳۸۲.

[۲۲] داغیانی، حمیدرضا، قاسمعلیان، رضا، جهانی، کمال، "بررسی مکانیزم آسیب در مخازن تحت فشار و مقایسهٔ استانداردهای این مخازن در خودروهای گازسوز،" مجموعهٔ مقالات اولین کنفرانس تبدیل سوخت خودروها به گاز طبیعی فشرده CNG، ۲۹ و ۳۰ دی‌ماه ۱۳۸۱.

[۲۳] تهامی، عبدالرضا، مومنی، علی، لطفی‌حقیقت، مجید، "بررسی روش‌های تولید مخازن CNG برای استفاده در خودرو،" مجموعهٔ مقالات اولین کنفرانس تبدیل سوخت خودروها به گاز طبیعی فشرده CNG، ۲۹ و ۳۰ دی‌ماه ۱۳۸۱.

[۲۴] بابایی، علیرضا، "بازرسی‌های غیرمخرب روی مخازن نگهداری گاز طبیعی فشرده CNG،" مجموعهٔ مقالات اولین کنفرانس تبدیل سوخت خودروها به گاز طبیعی فشرده CNG، ۲۹ و ۳۰ دی‌ماه ۱۳۸۱.

[۲۵] مومنی، علی و رستم‌نژاد، مازیار، "بررسی انواع روش‌های ذخیره‌سازی گاز طبیعی در خودرو،" مجموعهٔ مقالات اولین کنفرانس تبدیل سوخت خودروها به گاز طبیعی فشرده CNG، ۲۹ و ۳۰ دی‌ماه ۱۳۸۱.

[۲۶] شهپری، علیرضا و میرزابابایی، سید مهدی، "تکنولوژی ساخت مخازن فشار بالا CNG از جنس مواد مرکب،" مجموعهٔ مقالات اولین کنفرانس تبدیل سوخت خودروها به گاز طبیعی فشرده CNG، ۲۹ و ۳۰ دی‌ماه ۱۳۸۱.

[۲۷] قماشی، حسین، ده‌سنگی، حمید، نورانی، محمدرضا، "فناوری‌های تولید مخازن ذخیرهٔ گاز طبیعی در خودرو،" مجموعهٔ مقالات اولین کنفرانس تبدیل سوخت خودروها به گاز طبیعی فشرده CNG، ۲۹ و ۳۰ دی‌ماه ۱۳۸۱.

[۲۸] سجده‌ای، فراز، "ایمنی و دوام سیستم ذخیرهٔ سوخت NGV،" مجموعهٔ مقالات اولین کنفرانس تبدیل سوخت خودروها به گاز طبیعی فشرده CNG، ۲۹ و ۳۰ دی‌ماه ۱۳۸۱.

واژه‌نامه فارسی– انگلیسی

آ

آستری	Liner
آزمون تخریب هیدرواستاتیکی	Hydrostatic Pressure Burst Test
آزمون غیرمخرب	Nondestructive Test
آزمون مخرب	Destructive Test

ا

استاندارد خودروهای موتوری فدرال	Federal Motor Vehicle Standard (FMVSS)
الیاف آرامید	Aramid Fiber
الیاف‌پیچی	Filament Winding
الیاف شیشه‌ای	Fiberglass
الیاف کربن	Carbon Fiber
الیاف هیبرید	Hybrid Fiber
انتشار آکوستیک	Acoustic Emission (AE)
انتهای عدسی‌شکل	Convey End
انجمن گاز فشرده	Compressed Gas Association

ب

بازپخت	Tempering
بازرسی اولتراسونیک	Ultrasonic Inspection

پ

پلی‌اتیلن با چگالی بالا	High Density Polyethelen (HDPE)
پیچش خیس	Wet Wound
پیچش طولی	Polar Wrapped
پیچش کامل	Fully Wrapped
پیچش مارپیچی (ضربدری)	Helical Wrapped

Hoop Wrapped	پیچش محیطی

ت

Conformable	تطابق‌پذیر

ج

Fiber Matrix Shearing	جدایی ماتریس و الیاف

چ

Spinning	چرخش
Toughness	چقرمگی

د

Bifuel	دوسوخته
Dual Fuel	دوگانه‌سوز

ر

Resin	رزین

س

Shot-Blasting	ساچمه‌زنی
Hardness	سختی
Quenching	سردکردن سریع
Integrated Storage System	سیستم ذخیره سوخت یکپارچه

ش

Fiber Breakage in Compression	شکست الیاف در وضعیت فشردگی
Fiber Breakage in Tension	شکست الیاف در وضعیت کشش
Neck Spinning	شکل‌دهی چرخشی گلویی
Billet	شمشال

ع

Marking	علامت‌گذاری

عملیات حرارتی	Heat Treatment

ق

قالب‌گیری چرخشی	Rotational Molding
قرارگیری در معرض آتش	Bonfire

ک

کامپوزیت	Composite

گ

گاز طبیعی جذب‌شده	Absorbed Natural Gas (ANG)
گاز طبیعی فشرده	Compressed Natural Gas (CNG)
گاز طبیعی مایع‌شده	Liquefied Natural Gas (LNG)

م

ماتریس در وضعیت فشردگی	Matrix in Compression
ماتریس در وضعیت کشش	Matrix in Tension
مخزن CNG	CNG-cylinder
مخزن CNG نوع ۱	CNG-I
مخزن CNG نوع ۲	CNG-II
مخزن CNG نوع ۳	CNG-III
مخزن CNG نوع ۴	CNG-IV

ن

نافی فلزی	Metal End Nozzle
نشت پیش از شکست	Leak Before Burst (LBB)