



تجهیزات جدید برای ارزیابی ایمنی وسایل نقلیه مجهز به پیل سوختی و هیدروژن

رسول عبدالله میرزایی^۱، محمدحسین ممجد^۲

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، دانشکده علوم پایه

چکیده

به منظور ارزیابی ایمنی وسایل نقلیه مجهز به پیل سوختی و هیدروژن، تجهیزات جدیدی ساخته شده است. تجهیزات جدید شامل یک ساختمان تست آتش که درون آن نسبت به آتش مقاوم است و تجهیزات ارزیابی ایمنی تانک فشار بالای هیدروژن است. داخل ساختمان تست آتش سوزی وسایل نقلیه به میزان کافی قدرت تحمل هر نوع انفجار یک مخزن هیدروژن فشار بالا با ظرفیت ۲۶۰ لیتر و فشار ۷۰ MPa را دارد. و نیز فضای کافی و امکان لازم برای مشاهده شعله‌های آتش سوزی وسیله نقلیه که با هیدروژن و دیگر سوخت‌ها از قبیل بنزین یا گاز طبیعی کار می‌کنند را دارا است. ارتفاع داخلی ساختمان ۱۶ متر و ۱۸ متر قطر دارد. دیوارها ۱/۲ متر ضخامت داشته که با بتن و صفحه فولادی تقویت شده‌اند. این مقاله نشانگر مقایسه آتش سوزی وسیله نقلیه هیدروژن با دیگر سوخت‌ها و همچنین آتش سوزی مخزن هیدروژن فشار قوی با دیگر انواع منابع آتش سوزی است. دیگر تجهیزات ارزیابی ایمنی مخزن فشار بالای هیدروژن شامل یک کمپرسور هیدروژنی ۳۰۰ MPa برای تست انفجار ۷۰ MPa و مخازن با فشارهای بالاتر هستند. این تجهیزات نه تنها برای ارزیابی ایمنی خودروهای مجهز به هیدروژن و پیل سوختی بلکه برای تعیین و تنظیم استانداردها و کدهای بین المللی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: ایمنی پیل سوختی، هیدروژن، وسایل نقلیه، مخزن با فشار بالا

۱- مقدمه

برای آماده سازی پذیرش وسایل نقلیه مجهز به پیل سوختی از دیدگاه اقتصادی و ایمنی، می‌باید ایمنی کافی برای این گونه وسایل نقلیه فراهم شود. هیدروژن سوختی است که به آسانی نشت می‌کند و به میزان زیادی قابل اشتعال است و به دلیل ماهیت ذاتی‌اش با جزئی‌ترین انرژی آتش می‌گیرد [۱]. در بحث ذخیره‌سازی هیدروژن، به منظور توسعه دامنه وسایل نقلیه مجهز به سوخت هیدروژن و برای دستیابی به یک تجارت پویا، ذخیره‌سازی هیدروژن با دانسیته بالا، از طریق افزایش فشار و روش‌های دیگر لازم است. در حال حاضر خودروهای محدودی که از سوخت هیدروژن استفاده می‌کنند وجود دارد و تا کنون اطلاعات کافی و مناسبی برای ایمنی این گونه خودروها به دست نیامده است. به منظور دستیابی به ایمنی وسایل نقلیه مجهز به پیل سوختی می‌بایست برای جمع‌آوری اطلاعات لازم، شرایط مختلفی را در نظر گرفت که عبارتند از: (۱) ایمنی هیدروژن با

۱- استادیار شیمی فیزیک

۲- کارشناس صنایع شیمیایی (arashmomadjed@gmail.com)

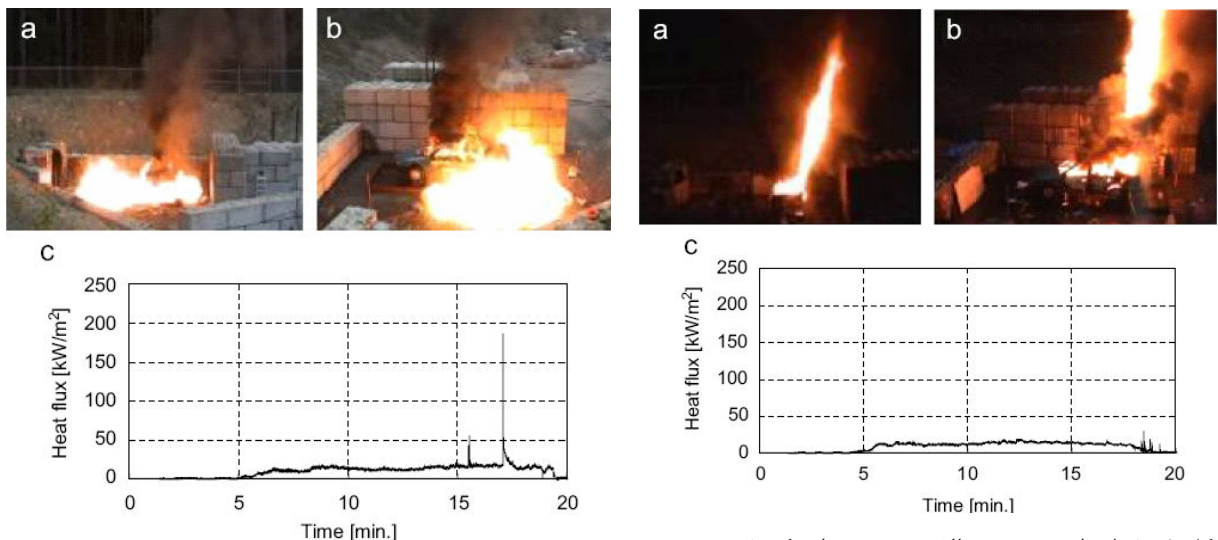


فشار بالا (۲) ایمنی خودرو در هنگام تصادف (۳) ایمنی آتش سوزی و قوانین مربوط به آن، کدها و استانداردهایی که می‌باید تدوین شوند.

با توجه به آنچه که آمد، انستیتوی تحقیق اتومبیل ژاپن مجموعه‌ای را برای ارزیابی ایمنی لازم در مورد قوانین، کدها و استانداردهای لازم برای هیدروژن و پیل سوختی تدارک دیده است. برای رسیدن به هدف مورد نظر در این پروژه یک وسیله مخصوص ارزیابی ایمنی خودرو مجهز به پیل سوختی ساخته شده است (Hy-sef).

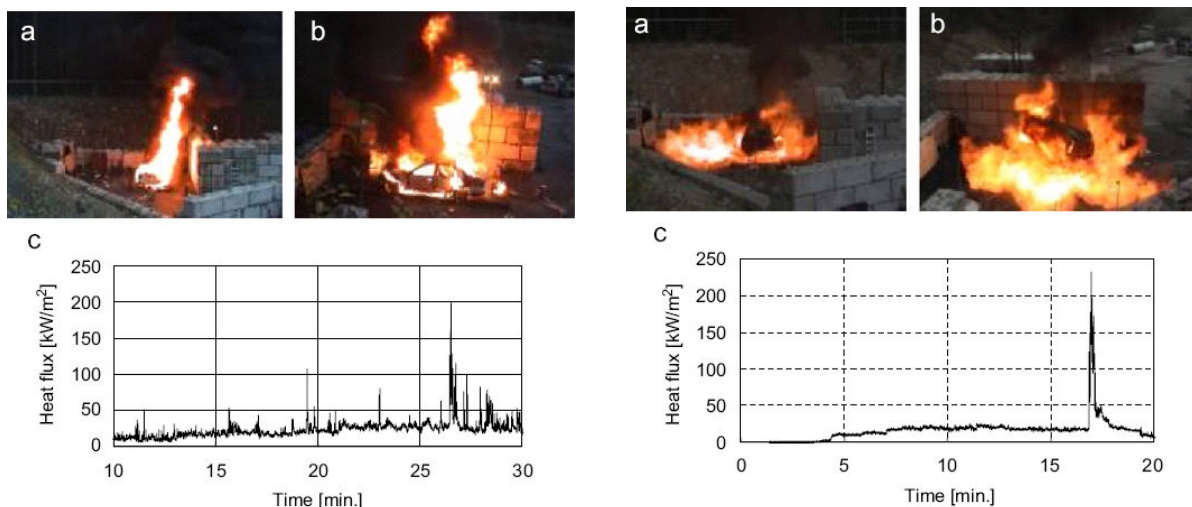
۲- تست‌های آتش سوزی برای وسایل نقلیه مجهز به مخزن‌های محتوی هیدروژن با فشار بالا

انستیتوی تحقیق اتومبیل ژاپن به بهره‌گیری از وسایل تست آزمایشگاه تکنولوژی قدرت کانادا، بیش از ساخت تجهیزات ارزیابی ایمنی وسیله نقلیه مجهز به پیل سوختی و هیدروژن، یک سری تست‌های آتش سوزی روی وسایل نقلیه مجهز به مخزن‌های محتوی هیدروژن با فشار بالا به منظور مقایسه با خودروهای بنزینی و خودروهای گاز طبیعی انجام داده است.



شکل ۲- شعله‌های به سمت پائین هیدروژن از یک خودروی در حال اشتعال که حاوی دو سیلندر ۳۵MPa با ظرفیت ۳۴L است. (a) دید از عقب (b) دید از کنار (c) فشار حرارتی.

شکل ۱- شعله‌های به سمت بالای هیدروژن از یک خودروی در حال اشتعال که حاوی دو سیلندر ۳۵MPa با ظرفیت ۳۴ L است. (a) دید از عقب (b) دید از کنار (c) فشار حرارتی.



شکل ۴- شعله‌های بنزین از خودروی در حال اشتعال با ظرفیت ۴۰L. (a) دید از عقب (b) دید از کنار (c) فشار حرارتی.

شکل ۳- شعله‌های به سمت پائین گاز طبیعی که از یک خودروی در حال اشتعال که حاوی دو سیلندر ۲۰MPa با ظرفیت ۳۴L (a) دید از عقب (b) دید از کنار (c) فشار حرارتی.



۷ و ۷ آبان ۱۳۸۸
October 28 & 29, 2009

سومین سمینار پیل سوختی ایران



3rd Fuel Cell Seminar of Iran



شکل‌های ۱ تا ۴ وضعیت شعله‌ها را در زمان حداکثر قدرت آتش سوزی در وسایل نقلیه با سوخت‌های متفاوت و همچنین اندازه‌گیری حرارت تولید شده در اطراف وسایل نقلیه را نشان می‌دهد. برای تولید آتش خودرو مشابه آتش‌های طبیعی سوخت جامد را با تجهیزات در دسترس آتش زدند. گرمای تولید شده در اطراف خودروها در فاصله یک متری و در ارتفاع ۱/۲ متر از سطح زمین اندازه گرفته شد.

شکل ۱ نمونه‌ای از نصب دو مخزن هیدروژن با فشار بالای ۳۵ MPa (با حجم ۳۴ L)، در بدنه خودرو با امکان آزادسازی هیدروژن به طرف بالا و در هنگام عملکرد شیر ایمنی در زمان نشت هیدروژن را نشان می‌دهد. شیرهای ایمنی در عرض ۱۴ دقیقه و ۲۶ ثانیه، و ۱۶ دقیقه و ۱۶ ثانیه بعد از وقوع آتش به کار انداخته شدند. زمانی که شعله‌های هیدروژن آزاد می‌شوند، هیچ مرز آشکار و واضحی از شعله‌های تولید شده قابل رویت نیستند.

شکل ۲ نمونه‌ای از نصب مخزن هیدروژن با فشار بالای ۳۵ MPa را با امکان آزادسازی هیدروژن، به طرف پائین نمایش می‌دهد. شیر ایمنی مخزن دوم در ۱۷ دقیقه و ۴ ثانیه بعد از وقوع آتش به کار انداخته شد. پیک شیر در نمودار به میزان حداکثر گرمای تولید شده 190 Kw/m^2 است.

شکل ۳ نمونه‌ای از نصب مخزن گاز طبیعی مترکم با ۲۰ MPa و با امکان آزادسازی گاز به سمت پائین را نشان می‌دهد. شیر ایمنی مخزن اول بعد از ۱۶ دقیقه و ۲۷ ثانیه به کار انداخته شد، در حالی که شیر ایمنی مخزن دوم بعد از ۱۶ دقیقه و ۵۳ ثانیه فعال شد. پیک شیر در نمودار به میزان حداکثر گرمای تولید شده 235 Kw/m^2 است.

شکل ۴ نمونه‌ای از یک مخزن بنزینی فولادی معمولی را با ظرفیت ۴۰ لیتر را نشان می‌دهد. از حدود ۱۴ دقیقه بعد از شروع آتش سوزی، بخار بنزین نشت پیدا کرده از مخزن بنزین می‌سوزد و موجب تولید شعله‌های متناوب می‌شود. میزان حداکثر گرمای تولید شده در حدود 200 Kw/m^2 است. اگر گسترش شعله‌های تولید شده در واحد زمان، و حداکثر توان آتش را در این چهار نوع وسیله نقلیه موجود در تست‌های آتش را با هم مقایسه کنیم خواهیم دید که شعله‌های آزاد شده از خودروی هیدروژنی فشار بالا، دارای این خصوصیات است: زمان آزادسازی آن کوتاه بوده، تاثیر گرمای آن به محیط اطراف کمتر است، میزان گسترش شعله‌ها مشابه خودروی بنزینی بوده و دامنه آن کمتر از گاز طبیعی است. زمان کوتاه آزادسازی به علت مقاومت پائین هیدروژن در عبور از شیر ایمنی است. تاثیر کم تشعشعات حرارتی شعله‌های هیدروژن به خاطر این است که این شعله‌ها قابل رویت نیستند و در واقع در هنگام آتش سوزی به صورت مرئی و قوی ظاهر نمی‌شوند. گسترش شعله‌ها در دامنه‌ای کمتر از گاز طبیعی است و در زمان کوتاه‌تری می‌سوزد. با توجه به نتایج حاصل از این آزمایش‌ها، می‌توان گفت که آتش سوزی در خودرویی با مخزن هیدروژن با فشار بالای ۳۵ MPa خیلی خطرناکتر از خودروهای موجود که با سوخت بنزینی و گاز طبیعی کار می‌کنند، نیست.

۳- وسایل سنجش ایمنی خودروی مجهز به پیل سوختی و هیدروژن

۳-۱- ساختمان تست آتش سوزی مقاوم به انفجار

زمان ارزیابی ایمنی مخزن‌های هیدروژن فشار بالا با وسایل نقلیه مجهز به چنین مخزن‌هایی، ارتباط مستقیم با مخزن‌های پوشیده شده با شرایط تست، انفجار مخزن‌های فشار بالا، نشت مقادیر زیاد هیدروژن، احتراق هیدروژن نشت کرده، انفجارها و دیگر خطرات ممکن دارد. در زمان اجرای تست آتش خودروها یا تست‌های شعله در مخزن‌های فشار بالا توسط شعله‌های حاصل از بنزین، نفت سبک و دیگر سوخت‌های مایع، مقدار زیادی دود تولید می‌شود و همچنین سر و صدای زیادی در زمان عملکرد شیرهای ایمنی مخزن به وجود می‌آید. در زمان انفجار مخزن و در زمان احتراق هیدروژن نشت شده، دیگر اثرات آزمایش‌ها روی محیط اطراف نیز مورد توجه هستند. تاکنون تست‌های تولید شعله در مخزن‌های با فشار بالا و تست‌های آتش سوزی خودرو در کوه‌ها، در صحراها و دور از محل زندگی انسان انجام شده است. انجام این تست‌ها در فضای باز به شدت تحت

تأثیر آب و هوا، و شرایط محیطی در زمان اجرای تست است و بنابراین امکان تکرار مجدد تست و به دست آوردن همان نتایج مشکل است. همچنین محدودیتی در نصب و راه اندازی تجهیزات اندازه گیری مورد نیاز برای کسب اطلاعات دقیق مربوط به تست وجود دارد.

با توجه به آنچه اشاره شد به جهت امکان پذیر نمودن تست های مربوط به شعله مخزن های فشار بالا و تست آتش سوزی خودروها اقدام به ساخت تجهیزاتی جهت تست هایی که اشاره شد نمودند، که این تجهیزات در مقابل انفجار نیز مقاوم هستند. شکل ظاهری این دستگاه در شکل ۵ نشان داده شده است و در شکل ۶ تصویری از مقطع عرضی ساختمانی که تست در آن صورت گرفته نمایش داده شده است. این ساختمان به طور نسبی فضای بزرگی برای اندازه گیری گسترش شعله های خارج شده، در زمانی که هیدروژن از شیرهای ایمنی مخزن فشار بالا خارج می شود، را داراست، که تحت عنوان وسایل کاهش فشار نامیده می شوند و در لحظه بروز آتش سوزی خودرو، در محیط اطراف تأثیر می گذارند. قطر داخلی ساختمان تست ۱۸ متر و ارتفاع سقف آن ۱۶ متر است. به علاوه، به منظور ایجاد قدرت کافی در برابر انفجارهای احتمالی، دیوارها با بتن های تقویت شده به ضخامت ۱/۲ متر همراه با ورقه های فولادی ضخیم در حدود ۶ تا ۱۲ میلی متر در داخل آن محافظت می شوند. حتی در ورودی و منافذ خروج بخار که حساس ترین قسمت سقف از لحاظ ساختاری هستند، به گونه ای طراحی شده است که در برابر فشار ۳۲۰ kPa G مقاومت دارد. در چنین فشاری احتمال انفجار هیدروژن آزاد شده از یک مخزن هیدروژن با حجم ۲۶۰ لیتر و فشار بالای ۷۰ MPa را می توان تصور کرد. ۱۶ کیلوگرم TNT را در ساختمان تست جهت تولید موج انفجار، منفجر کردند. سپس میزان تغییرات و آسیب های تولید شده را در نزدیکی منافذ سقف اندازه گرفتند و مقاومت ساختمان در برابر فشار تأیید شد [۲]. لازم به ذکر است که قسمت مرکزی کف ساختمان تست از آجر نسوز ساخته شده است تا مقاومت در برابر حرارت را برای تست های آتش تأمین کند. به علاوه قسمت مرکزی کف ساختمان قوی ترین موج انفجار را در زمان انفجار دریافت می کند. بنابراین این قسمت توسط بتن تقویت شده به ضخامت ۴ متر مقاوم سازی شده است تا در برابر ضربات ناشی از انفجار و لرزش های آن ایمن گردد. ساختمان تست دارای دو در آهنی است. یک در برای ورود خودروها و وسایل دیگر که اندازه آن ۲/۴*۲/۴ متر است، و در دیگر که اندازه آن ۲*۰/۹ متر است برای ورود کارکنان در نظر گرفته شده است. به علاوه، در مورد تست های نفوذ گلوله تفنگ، تصریح شده در آئین نامه های غربی، سوراخی با قطر داخلی ۲۰ سانتی متر در ارتفاع یک متری از کف زمین در نظر گرفته شده است، به نحوی که این امکان را فراهم می سازد تا یک گلوله از خارج ساختمان تست به سمت مخزنی در داخل ساختمان تست شلیک شود.



شکل ۶- تصویری از برش عرضی ساختمان تست آتش سوزی.



شکل ۵- عکسی از یک ساختمان تست آتش که درون آن نسبت به انفجار مقاوم است.

به منظور اجرای تست‌های آتش، یک تونل زیر زمینی حاوی هوا به شکل دایره‌ای در محیط اطراف ساخته شده است و از یک ماشین دمنده هوا که امکان تهیه 750 Nm^3 هوا در هر دقیقه را از طریق ۲۴ دریچه هوا فراهم می‌سازد، استفاده کردند. منافذ دریچه هوا از نوع فنری ساخته شده است تا از حرکت موج انفجار تولید شده ساختمان تست به سمت دمنده‌های هوا جلوگیری کنند تا آسیبی به این تجهیزات وارد نشود. به علاوه، تست‌های ارتباطی بین دریچه‌های هوا و تونل‌های محتوی هوا توسط بازدارنده‌های شعله تجهیز شدند، تا ارتباط بین دریچه‌های هوا و تونل‌های محتوی هوا توسط بازدارنده‌های شعله جلوگیری شود. با این کار از ورود شعله‌های هیدروژن به داخل دمنده‌های هوا جلوگیری می‌کنند.

در سیستم خروج بخار مقدار زیادی از دود و مواد مضر تولید شده در زمان تست‌های آتش سوزی خودرو و مواد دیگر از طریق یک نوع سیستم تهویه و تمیز کننده معکوس (سیستمی که با استفاده از فیلترهای سرد کننده جدید از سمت مخالف هوا را می‌دمد)، فیلتر سرمایی و جذب توسط یک عامل جاذب (خاک دی اتمه + آهک آبدار + زغال چوب) در نهایت توسط یک وسیله تصفیه کننده بخار، از بین می‌روند. جدول یک نتایج تجزیه مواد زیان آور بخار را قبل و بعد از استفاده از وسیله تصفیه کننده بخار، در زمان اجرای یک تست آتش روی خودرو معمولی با ۱۰ لیتر بنزین را نشان می‌دهد و این نتایج را با آئین نامه‌های زیست محیطی ژاپن مقایسه می‌نماید. در وضعیتی که بخار تصفیه نشده باشد، خروج ذرات کوچک و دی اکسیدها بالاتر از قوانین زیست محیطی بوده، اما بعد از تصفیه بخار، میزان همه آن‌ها به میزان کمتری از قوانین محیط زیست کاهش یافتند. به علاوه، تاثیر سرو صدای تولید شده در زمان رها شدن هیدروژن در لحظه عملکرد شیر ایمنی مخزن و همچنین سر و صدای انفجارهای ایجاد شده در ساختمان تست و تاثیر آن‌ها در محیط بیرون توسط یک صدا خفه کن بزرگ به منظور کاهش میزان فشار صوتی تا حد ۸۰dB فراهم شده است.

جدول ۱

دی‌اکسید (ng-TEQ/Nm ³)	HCl (ppm)	SO _x (ppm)	دوده (g/Nm ³)		
۵	۴۳۰	۴۰	۰/۰۱	مقدار طراحی شده	قوانین زیست محیطی ژاپن
۲۹	۲۴	< ۱	۰/۲۱	مقدار اندازه‌گیری شده	خروجی تصفیه شده
۰/۰۴۶	< ۴	< ۱	۰/۰۰۲۷		خروجی تصفیه نشده

تکمیل چنین ساختمان تست آتشی که مقاوم در برابر انفجار باشد، این امکان را برای انجام تست‌های شعله مخزن‌های هیدروژن فشار بالا، تست‌های آتش خودروها و غیره را به گونه‌ای که انجام این آزمایشات با دقت بالا و همین‌طور امکان تکرار پذیری مناسب همراه با ایمنی کارکنان توأم باشد و تاثیری روی محیط اطراف نداشته باشد، را فراهم می‌سازد.

۲-۳- تست‌های شعله مخزن هیدروژن فشار بالا

یکی از لازمه‌های ایمنی در آئین نامه‌های مخزن‌های هیدروژن فشار بالا، حذف موانع توسط مخزن‌های تست شعله است. تست فوق به این منظور انجام می‌شود چنانچه خودروی مجهز به مخزن فشار بالا درگیر آتش‌سوزی می‌شود، قبل از انفجار، شیر ایمنی آن عمل کرده و کلیه گاز داخل مخزن را آزاد نماید. در چنین شرایطی صدمات احتمالی به حداقل خواهد رسید. در ژاپن روش استفاده شده، تست شعله در قانون ایمنی گاز با فشار بالا^۱ به ثبت رسیده است. در ایالات متحده تحت عنوان قوانین مربوط به خودروی هیدروژنی (HGV)^۲ و در اروپا تحت عنوان پروژه جامع هیدروژن (EIH)^۳ مورد بحث است، که در این

¹- High Pressure Gas Safety Act

²- Hydrogen Gas Vehicle

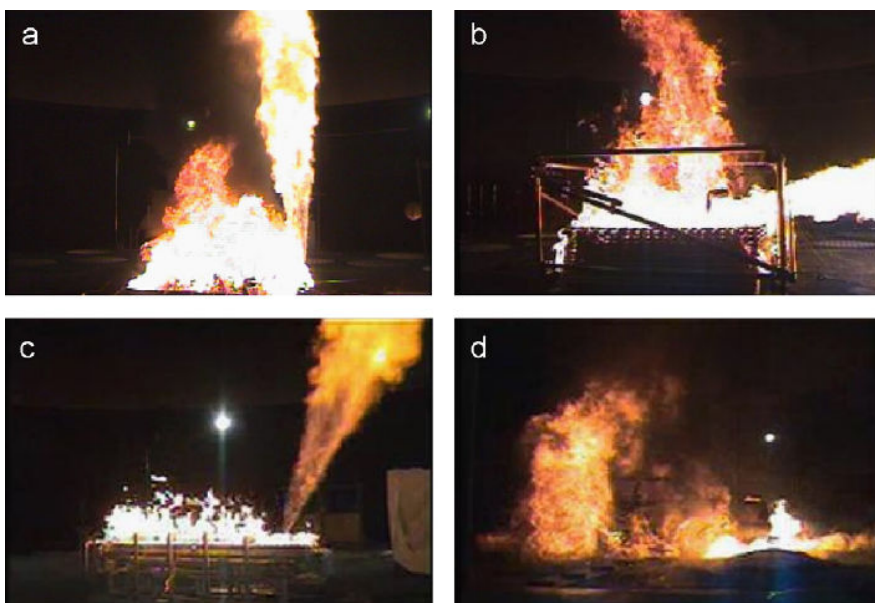
³- European Integrated Hydrogen



قوانین تنها شرایط عمومی، نظیر ابعاد شعله و درجه حرارت سطحی مخزن در آن‌ها مشخص شده است. سایر قوانین جزئی نظیر انواع سوخت‌های مورد استفاده به عنوان منابع تولید کننده احتراق، روش‌های حفاظتی شیرهای ایمنی به نحوی که به طور غیر مستقیم در معرض شعله نباشند، خصوصیات ترموکوپل‌ها برای اندازه‌گیری درجه حرارت‌های سطحی مخزن و محیط اطراف آن در زمان اجرای تست‌های درجه حرارت و باد تا کنون مقرر نشده است. براساس تحقیقات صورت گرفته روی انواع سوخت‌های مختلف به عنوان منابع تولید کننده آتش در طول شرایط این تست‌ها تمرکز شد و اثرات آن‌ها ارزیابی شده و آن‌ها را با شرایط شعله مخزن‌های فشار بالا در لحظه آتش سوزی‌های وسیله نقلیه مقایسه شده است. این تست‌ها به چهار روش صورت گرفته است: (۱) شعله‌های نفت سبک، (۲) شعله‌های چوب سرو، (۳) شعله‌های سوزاننده پروپان و (۴) آتش سوزی‌های خودرو.

برای شعله‌های نفت سبک از یک تانک به طول ۱۶۵۰ میلی‌متر و عرض ۱۰۰۰ میلی‌متر و عمق ۱۰۰ میلی‌متر استفاده شد، همچنین از یک سوخت حاوی نفت سبک به میزان ۴۰ لیتر به علاوه ۰/۶ لیتر بنزین به همراه مقدار مناسبی آب به منظور تنظیم ارتفاع سطح مایع استفاده شد.

برای شعله‌های چوب، از چوب‌های سرو در عرض ۴۰ میلی‌متر، طول ۱۶۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۲۰ میلی‌متر که در یک ارتفاع ۴۴۰ میلی‌متر توده شد بود استفاده کردند و ۴ لیتر از نفت چراغ و ۰/۳ لیتر از سوخت الکلی جامد به منظور ایجاد احتراق اضافه کردیم. برای شعله‌های سوزاننده پروپان از کوره‌ای به طول ۲۰۰۰ میلی‌متر و عرض ۳۰۰ میلی‌متر استفاده شد. تست‌ها به دو روش مختلف صورت گرفتند نخست با استفاده از جریان گاز طبیعی به میزان ۹۰ L/min و دیگری ۱۹۰ L/min. آتش را در مخزن هیدروژن فشار بالا، در محلی زیر بدنه خودرو، در حالی که مخزن بنزین از محل دور شده بود ایجاد گردید. مخزن‌های استفاده شده در تست از نوع ۳ مخزن‌هایی بودند که از آسترهای آلومینیومی تقویت شده توسط فیبرهای کربنی تقویت شده با پلاستیک با ظرفیت ۳۴ لیتر ساخته شده بودند. شیرهای ایمنی مخزن نیز از نوع درپوش قابل فلزی بود. حالت آزاد شدن شعله‌های هیدروژن، در زمان عملکرد شیر ایمنی مخزن هنگام انجام تست‌ها در شکل‌های (a) - (d) ۷ نشان داده شده است. در تمامی تست‌ها، مخازن هیدروژن فشار بالا منفجر شدند، و هیدروژن پس از انفجار توسط شیرهای ایمنی آزاد شد. بنابراین مواد تصریح شده در قوانین مورد تأیید قرار گرفتند.



شکل ۷- حالتی از یک انتشار شعله‌های هیدروژن در زمان عملکرد شیر ایمنی مخزن. (a) آتش سوزی استخری (گودالی) از نفت سبک (b) شعله چوب سرو (c) سوختن پروپان (d) آتش سوزی وسیله نقلیه (190L/min)

در هر حال عملکرد شیر ایمنی مخزن در شرایط مختلف تست همان طور که در جدول ۲ نشان داده شده متفاوت است. به هنگام بروز آتش سوزی خودرو، مدت زمانی طول می کشد تا شعله ها از مکانی که خودرو در آنجا قرار دارد و آتش شروع شده، به مکانی که مخزن نصب شده، گسترش پیدا کند، بنابراین، با مقایسه تست هیدروژن نسبت به تست های شعله مخزن- های دیگر مشخص می گردد، که زمان لازم برای عملکرد شیر ایمنی مخزن هیدروژن به طور قابل ملاحظه ای طولانی تر است. که علت آن به طور عمده ای، به علت وجود مواد به کار برده شده در بخش سرنشینان خودرو است. شرایط شعله و درجه حرارت تولید شده در مخزن هیدروژن فشار بالای نصب شده در بخش تحتانی وسیله نقلیه متفاوت با شعله های تولید شده از انتهای یک مخزن در یک مخزن شی منفرد مربوط به تست است. درجه حرارت سطح مخزن در زمان عملکرد شیر ایمنی بالا و در حدود $100^{\circ}C$ در انتهای مخزن بود. همچنین درجه حرارت در انتهای مخزن بالاتر از درجه حرارت قسمت فوقانی مخزن بود. از طرف دیگر، در هنگام آتش سوزی خودرو، درجه حرارت در انتهای مخزن $55/9^{\circ}C$ ، و در قسمت فوقانی مخزن $89/7^{\circ}C$ بود که نشانگر این است که درجه حرارت بخش فوقانی بالاتر از درجه حرارت قسمت انتهایی آن بود. با این روش، در لحظه آتش سوزی خودرو می توان گفت که یک مخزن هیدروژن فشار بالا کمتر در معرض مستقیم شعله ها قرار می گیرد و در نتیجه به تدریج توسط افزایش درجه حرارت، محیط اطراف نیز گرم می شود. در نتیجه، درجه حرارت هیدروژن داخل مخزن افزایش پیدا می کند و نسبت بالا رفتن فشار در لحظه عملکرد شیر ایمنی مخزن زیاد و به میزان $1/20$ می شود. (فشار داخل در لحظه عملکرد شیر ایمنی/ فشار داخلی در زمان شروع تست).

جدول ۲

آتش سوزی خودرو	پروپان (۱۹۰ l/min)	پروپان (۹۰ l/min)	چوب	نفت سبک	
۳۹/۴ (۳۲/۹)	۳۵/۲ (۳۲/۷)	۴۰/۳ (۳۲/۹)	۳۶/۹ (۳۲/۸)	۳۵/۱ (۳۳/۶)	حداکثر فشار (فشار اشباع) (MPa)
۱/۲۰	۱/۰۸	۱/۲۲	۱/۱۳	۱/۰۴	نسبت افزایش فشار (%)
۰/۵۶۱	۱/۴۹	۱/۶۰	۲/۳۱	۱/۰۱	سرعت افزایش فشار (Mpa/min)
۶۹۸	۹۹	۲۷۳	۱۰۸	۹۰	زمان عملکرد وسیله تنظیم فشار (s)
۸۹/۷	۱۸۸	۸۴/۰	۲۰۷	۱۴۷	میانگین دمای سطح بالای مخزن ($^{\circ}C$)
۵۵/۹	۶۲۵	۷۷۵	۳۲۷	۳۸۰	میانگین دمای سطح پایینی مخزن ($^{\circ}C$)

در تست مخزن (مخزنی که روی خودرو نصب شده است) جایی که شرایط آتش خودرو و نسبت افزایش شعله در نزدیکترین حالت باشد، از شعله های سوزان با کوچکترین اندازه شعله و جریانی 90L/min از پروپان استفاده شده است. با این روش، تست های شعله مخازن هیدروژن فشار بالا می تواند نتایج متفاوتی را بسته به جزئیات تست داشته باشد، که ممکن است ربطی به شرایط تصریح شده در آئین نامه ها و یا قوانین نداشته باشند. نتایج ارزیابی ها با هر روش تستی نتیجه متفاوتی خواهد داشت. در آینده روی اثرات ابعاد شعله، پوشش های شیر ایمنی، محیط اطراف و... ارزیابی، بحث و بررسی می شود.

۳-۳- دیگر وسایل تست

جدیداً در مورد وسایل تست ارزیابی ایمنی خودروی مجهز به پیل سوختی و هیدروژن، تجهیزات مختلفی معرفی شده است، که امکان اجرای تست های ارزیابی جامع ایمنی تصریح شده در قوانین مخزن های هیدروژن فشار بالا را امکان پذیر می سازد.

۳-۳-۱- دستگاه تست اشباع هیدروژن فشار بالا

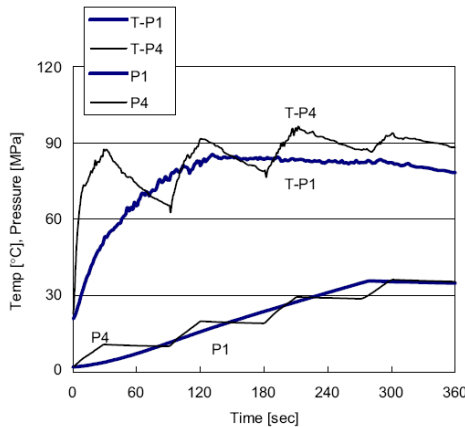
دستگاه تست اشباع هیدروژن فشار بالا که امکان اجرای سریع تست‌های اشباع را برای مخازن هیدروژن فشار بالا، تست‌های چرخه گاز، تست‌های نشت پذیری گاز، تست‌های ارزیابی دوام و پایداری بست‌ها و... را فراهم می‌سازد. این دستگاه از یک کمپرسور هیدروژن فشار بالا، یک مخزن ذخیره سازی هیدروژن فشار بالا، یک دستگاه کنترل اشباع (پرکننده)، وسایل کنترل درجه حرارت مانع دخول هوا (air-Tight)، تله‌های گاز و مخزن حائل بازیابی هیدروژن تشکیل شده است. کمپرسور هیدروژن فشار بالا از نوع پیستونی روغن کاری شده با ویژگی خنک‌کنندگی هوا است که توانایی تراکم سازی پنج مرحله‌ای برای مخازن بسیار بزرگ و فشار بسیار زیاده 70 MPa و ظرفیت داخلی 260 لیتر را فراهم شده‌اند. مخزن ذخیره سازی هیدروژن فشار بالا مشتمل بر 9 مخزن آلیاژ فولادی با پایه Cr-Mo و با ظرفیت‌های داخلی $72/5$ لیتر و قابلیت به کارگیری فشار 110 MPa است. دستگاه کنترل اشباع گاز هیدروژن می‌تواند آزادانه نصب شود و سرعت اشباع و فشار اشباع را مطابق با فشار استفاده شده و ظرفیت مخزن کنترل کند، به گونه‌ای که امکان اجرای تست‌های اشباع سریع تست‌های چرخه گاز و غیره را فراهم می‌سازد. وسیله کنترل درجه حرارت هوا مانع دخول هوا، درجه حرارت محیط اطراف مخزن را بین $40-85$ درجه سانتی‌گراد کنترل می‌کند، و همین‌طور امکان اندازه‌گیری سرعت نشت پذیری گاز هیدروژن را از میان یک مخزن با آستر پلاستیکی را فراهم می‌سازد. تله‌گازی برای اجرای تست‌های اشباع گاز به طور ایمن است و امکان تطابق وسیله کنترل درجه حرارت مانع دخول هوا با سایز بزرگ را فراهم می‌سازد که این امر از طریق ساخته شدن این وسیله با سایز 6 متر (طول) * 3 متر (عرض) * 3 متر (عمق) و پوشش فوقانی آن با یک سرپوش آهنی امکان‌پذیر می‌شود. مخزن حائل بازیابی هیدروژن برای بازیافت هیدروژن آزاد شده، در یک تست چرخه گاز استفاده می‌شود و مشتمل بر دو مجموعه که هر یک در برگیرنده 30 مخزن مرتبط با هم با حجم داخلی 47 لیتر و بالاترین فشار اشباع $19/6 \text{ Mpa}$ هستند. عکس‌های کمپرسور هیدروژن فشار بالا، مخزن و ذخیره سازی هیدروژن فشار بالا و وسیله مانع دخول هوا در شکل‌ها (a)-(c) نشان داده شده‌اند.



شکل ۸- (a) کمپرسور هیدروژن فشار بالا (b) بانک ذخیره سازی مخازن هیدروژن فشار بالا (c) اتاق کنترل درجه حرارت

شکل ۹ رفتار درجه حرارت گاز را در یک تانک نوع ۳ با طرح‌های مختلفی از اشباع نشان می‌دهد [۳]. رفتار $T-P1$ درجه حرارت گاز را با الگوی افزایش فشار $P1$ نشان می‌دهد و فشار به صورت خطی افزایش می‌یابد. زمانی که فشار افزایش می‌یابد، درجه حرارت به سرعت افزایش پیدا می‌کند. در هر حال، بعد از 120 ثانیه، افزایش درجه حرارت به یک حد اشباع می‌رسد که به علت تعادل بین گرمای تولید شده و گرمای آزاد شده است. رفتار $T-P4$ درجه حرارت گاز را با الگوی افزایش فشار $P4$ نشان می‌دهد، فشار مرحله به مرحله افزایش می‌یابد. در آغاز پر شدن، افزایش فشار خیلی سریع است و درجه حرارت گاز نیز خیلی به سرعت افزایش پیدا می‌کند. بعد از 30 ثانیه، پر شدن برای مدت 60 ثانیه متوقف می‌شود و سپس درجه حرارت گاز کاهش

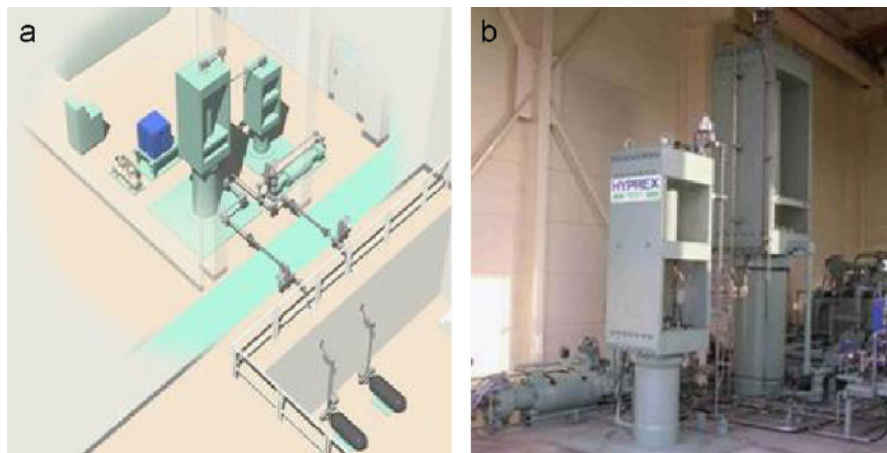
می‌یابد. سپس فشار مجدداً بالا رفته و درجه حرارت نیز افزایش پیدا می‌کند. حداکثر درجه حرارت گاز الگوی P4 بالاتر از الگوی P1 است، اگر چه زمان کلی پرشدن هر دو الگو مشابه هم و ۳۰۰ ثانیه است. افزایش فشار با سرعت بالاتر، حداکثر درجه حرارت گاز را در مخزن افزایش می‌دهد. الگوی افزایش فشار به صورت ثابت و آهسته برای کنترل درجه حرارت در یک حد پائین ارجح است.



شکل ۹- دمای گاز در تنک نوع ۳ با الگوهای متفاوت افزایش فشار

۳-۳-۲- وسیله تست فشار هیدرولیک

یک دستگاه تست فشار هیدرولیک به منظور اندازه‌گیری فشار انفجاری در مخازن فشار بالا و ارزیابی مقاومت و پایداری آن‌ها توسط تست‌های چرخه فشار معرفی شده است. سیستم فوق از یک پمپ هیدرولیک روغنی استفاده می‌کند که به وسیله فشاردادن یک پیستون موجب افزایش فشار آب می‌گردد. برای تست‌های دوره‌ای فشار، حداکثر فشار به کار گرفته شده MPa ۱۲۰ و ظرفیت مخازن استفاده شده در تست ۲۶۰-۲۰ لیتر بود. یک تا ده دوره از افزایش و کاهش فشار در هر دقیقه برای هر ظرفیتی از مخزن اجرا شد. برای تست‌های انفجاری از یک تقویت کننده فشار حداکثر به میزان MPa ۳۰۰ استفاده شد تا امکان اجرای تست‌های انفجاری به میزان MPa ۷۰ را در مخازن با فشار بسیار بالا فراهم سازد. تست‌های فشار آب، به وسیله هدایت یک لوله آب فشار بالا، به مجاورت گودال انفجار اجرا شد. برای پنجره سرپوش از شیشه تقویت شده استفاده شد، تا امکان مشاهده هر گونه رفتار را در زمان انفجار مخزن در گودال فراهم سازد. دیاگرامی از وسیله تست هیدرولیک فشار و عکسی از تقویت کننده در شکل‌های (a),(b) نشان داده شده است.

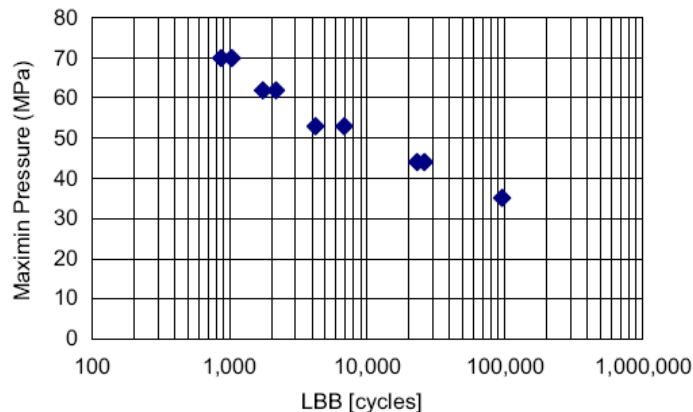


شکل ۱۰- (a) دیاگرام وسایل تست فشار هیدرولیک (b) عکس تشدید کننده‌ها.

شکل ۱۱ ارتباط بین فشار حداکثر تست دوره‌ای فشار هیدرولیک را با LBB^۱، نشت قبل از تخریب، مخزن نوع ۳ با آستر آلومینیومی را نشان می‌دهد [۴]. شماره‌های چرخه LBB مطابق با افزایش فشار حداکثر کاهش می‌یابند. این مسأله نشانگر آن

¹ - Leak Before Break

است که اگر از یک فشار بسیار زیاد برای پر کردن یک مخزن استفاده شود موجب انفجار آن مخزن نخواهد شد ولی طول عمر مخزن کوتاهتر خواهد شد [۵].



شکل ۱۱- رابطه بین حداکثر فشار در چرخه تست فشار هیدرولیک و جرقه‌های LBB تانک نوع ۳

۴- نتیجه‌گیری

مخازن هیدروژن فشار بالایی که مربوط به خودرو از نوع مخازن سبک وزن با قابلیت فشار ۳۵ MPa یا فشارهای بالاتر هستند، از فیبرهای کربنی تقویت شده با پلاستیک ساخته می‌شوند، همه این عوامل بر اساس در نظر گرفتن محدودیت‌های وزن و فضای مخزن‌ها به منظور نصب روی وسایل نقلیه تعیین شده‌اند. همانند قوانین مربوط به مخزن‌های هیدروژن فشار بالای خودرو در ژاپن، قوانینی در ۳۱ مارس ۲۰۰۵ وضع شدند که به قانون ایمنی گاز با فشار بالا اضافه شدند. به همین دلیل یک سری قوانین مشابه در ایالات متحده توسط وزارت حمل و نقل (DOT) برای خودروهای مجهز به گاز هیدروژن و همین طور در اروپا توسط پروژه هیدروژن جامع اروپا (EIH) شکل گرفتند. به علاوه استانداردهای بین‌المللی در ISO/TC197/WG6 بررسی شده است. آئین‌نامه‌ها و قوانین مربوط به وسایل نقلیه مجهز به مخازن هیدروژن فشار بالا در ژاپن تحت عنوان قانون خودروهای حمل و نقل جاده‌ای تصویب شده‌اند. به عنوان قوانین بین‌المللی برنامه ریزی قوانین تکنیکی جهانی به گونه‌ای است که استاندارد UN-ECE/WP29/GPRE بررسی شده‌اند. علاوه بر آنچه که آمد می‌بایست استانداردها و قوانین زیادی تصویب شوند تا ملزومات وسایل اطفای حریق را برای ورود خودروهای هیدروژن به پارکینگ‌های مسقف مشخص سازند. همچنین ایمنی خودروهای مجهز به پیل سوختی و هیدروژن را افزایش داده و موجب محبوبیت آن‌ها شوند و همچنین محدودیت‌های لازم را برای کامیون‌های حامل مخزن‌های هیدروژن فشار بالا در داخل تونل‌ها را مشخص نمایند. وسایل تست ارزیابی ایمنی خودروهای مجهز به پیل سوختی و هیدروژن گزارش شده در مقاله حاضر اطلاعات لازم را برای ایجاد کردن این قوانین فراهم ساخته و می‌تواند به منظور اجرای تست‌های تأیید ایمنی تصریح شده در آئین‌نامه‌ها و همین طور برای اجرای تست‌های تأیید کننده مخازن هیدروژن فشار بالا و خودروهای هیدروژنی و قوانین مربوط به آن در آینده همگام با قوانین بین‌المللی مورد استفاده قرار گیرند.

۵- منابع

۱- رسول عبدالله میرزایی، محمدحسین ممجد. ۱۳۸۸. هیدروژن: تولید، ذخیره سازی و ایمنی. دانشگاه تربیت مدرس شهید رجایی.



۱۳۸۸ و ۲۹ آبان ۱۳۸۷
October 28 & 29, 2009

سومین سمینار بین سوختی ایران



3rd Fuel Cell Seminar of Iran



دانشگاه صنعتی شاهرود

- 2- Suzuki J, Watanabe S, et al. Performance evaluation of explosion – proof fire test done to the air-hydrogen explosion. JARI res j 2005: 27(5)
- 3- Hirotsu R, Tonioka J, Macda y, et al. Thermal behavior in hydrogen storage tank for fuel cell vehicle on fast filling. In 10th world hydrogen energy conference, June 2006.
- 4- Iijima T, Qoi T, et al. An ambient temperature pressure cycling test of compressed hydrogen tanks for vehicles: Part 1- Influence of maximum pressure on tank life. JARI Res j 2006; 28(7).
- 5- S.Watanabe, Y.Tanura, J.Suzuki. 2007. The new facility for hydrogen and fuel cell vehicle safety evaluation. International journal of hydrogen energy 32:2154-2161